هندسة الجهد العالى

المهندس: وحيد مصطفى أحمد

High Voltage Engineering

دار الكتب العلمية
للنشر والتوزيع
القاهرة

هندسة الجهد العالي

High Voltage Engineering

مهندس
وحيد مصطفى أحمد

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع

دار الكتب المصرية

فهرسة أثناء النشر إعداد إدارة الشئون الفنية

احمد ، وحيد مصطفى

هندسة الجهد العالي = High Voltage Engineering / وحيد مصطفى أحمد –

ط ١ . القاهرة : **دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع** ٢٠١٢م

٥٢٢ ص ، ١٧ X ٢٤سم

ردمك : ٩٧٨-٩٧٧-٥٠٢٩-٥٨-٤

١. الهندسة الكهربائية ٢- الجهد الكهربى ٣- الكهرباء - توليد

أ. العنوان

ديوى ٦٢١.٣ ٢٠١٢/٣٧١٦

الطبعة الأولى

١٤٣٣هـ - ٢٠١٢ م

رقم الايداع : ٢٠١٢/٣٧١٦

ردمـــــك : ٩٧٨-٩٧٧-٥٠٢٩-٥٨-٤

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع

٥٠ شارع الشيخ ريحان – عابدين – القاهرة

☎ ٢٧٩٤٨٦١٩- ٢٧٩٥٤٢٢٩

فاكس: ٢٧٩٢٨٩٨٠

لمزيد من المعلومات يرجي زيارة موقعنا على الإنترنت

www.sbhegypt.org

e-mail : sbh@link.net

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة الكتاب

اجتاح العالم تطور سريع في مجال الطاقة الكهربية من حيث التوليد والنقل والتوزيع. ويناقش هذا الكتاب بتفاصيل كافية المبادئ المختلفة ومشاكل هندسة الجهد العالي وطرق التحليل.

ونظراً لهذا التطور الهائل تحول مجال هندسة الجهد العالي إلى موضوع متخصص عالي يتطلب تدريب طويل قبل الدخول في المشاكل المعقدة للعزل والجهود الزائدة التي تنشأ في أنظمة الجهد العالي الحديثة. وأصبحت الحاجة ملحة لكتاب يعطي فكرة كاملة عن الحالة الراهنة لهندسة الجهد العالي في إطار المسار العام وبرامج الكليات والمعاهد والدراسات العليا لخدمة العاملين من مدرسين ومهندسين وطلبة وفنيين في هذا المجال.

ويبدأ الكتاب بالفصل الأول الذي يناقش آليات الانهيار في الغازات والسوائل والمواد الصلبة، ثم الثاني لدراسة توليد الجهود العالية AC، DC ثم ننتقل إلى الثالث في توليد الجهود والتيارات الدفعية. ويتكلم الرابع عن الخصائص الكهربية والميكانيكية للعوازل. أما الخامس فيقدم دراسة عن أنواع وخواص ومواصفات عوازل الخط. ثم يأتي الفصل السادس لشرح عزل خطوط النقل الهوائية، ثم السابع لدراسة عوازل أجهزة المحطة. ثم الثامن لإلقاء نظرة على موضوع عزل معدات التوزيع وعوازل المناطق الصناعية والملوثة. ثم التاسع لدراسة عزل محولات القدرة وآلات الجهد العالي الدوارة [المولدات – المحركات] وعزل كابلات قدرة الضغط العالي.

أما الفصل العاشر فقد خصص لقياسات الجهد العالي والتيار، وتلاه الحادي عشر لدراسة الاختبارات على معدات الجهد العالي بأنواعها. وبعد ذلك في الفصل الثاني عشر تم دراسة الجهود الزائدة الجوية وطرق والوقاية منها بعد معرفة أسبابها. أما الثالث عشر فقد تطرق إلى دراسة كيفية حماية المحطات الفرعية والآلات الدوارة من الصواعق. وكان الختام مع دراسة

الجهود الزائدة الداخلية في أنظمة النقل طويل المسافة ثم بارامترات الخطوط ونماذج أبحاث الخطوط وارتفاع الجهد في أنظمة الحالة المستقرة وتأثير تيارات المغنطة على الجهود الزائدة وكذلك دراسة الجهود الزائدة في النقل طويل المسافة في حالات التعويض السعوي ودوائر القصر والأنظمة العابرة وتقييد الجهود الزائدة والتحكم فيها.

وأتمنى أن يكون هذا الكتاب مرجعاً مفيداً للمهندس والمدرسين والطلبة العاملين في هذا المجال وأقدم شكري العميق للسيد الناشر على ما قدمه من جهد وافر ومعاونة صادقة أدت إلى إخراج هذا الكتاب إلى الواقع لخير الأمة والبشرية.

م/ وحيد مصطفى أحمد



آلية انهيار المواد الغازية والسائلة والصلبة

Breakdown Mechanism of Gaseous, Liquid & Solid Materials

١-١ مقدمة Introduction

مع الطلب المتزايد من الطاقة الكهربية، ينمو نظام القدرة في كل من الحجم والتعقد. وتزداد سعات توليد وحدات توليد القدرة وجهد النقل بسبب مميزاتها المتأصلة. فإذا تضاعف جهد النقل فإن إمكانية نقل النظام تصبح أربعة أمثال وأيضاً تنخفض مفقودات الخط. ونتيجة لذلك، يصبح نظام أقوى واقتصادي. ويسود في المدن الكبرى استخدام جهود النقل التقليدية [110 kV، 220 kV] كجهود توزيع بسبب الطلب المتزايد. أي نظام [نقل، مفاتيح، ...إلخ] مصمم لـ 400 kV وأعلى يستخدم مواد عازلة يكون كبير الحجم ومُكلف -ولذلك- يتم تطوير مواد عازلة أحدث وأحدث دائماً لتخفيض كل من التكلفة ومطالب الفراغ. وتركب الموصلات الحية كهربياً على مواد عازلة مع ترك خلوص هواء كافي لتجنب حدوث الشرر أو قصر الدائرة بين الأجزاء الحية للنظام والمكونات المؤرضة. وأحياناً يجب غمر الموصلات الحية في سائل عازل لتخفيض حجم الحاوية وفي نفس الوقت التزود بعزل كافي بين الموصلات الحية والحاوية المؤرضة. في الهندسة الكهربية تستخدم كل الثلاث أوساط أي الغاز، السائل، والمادة الصلبة -ولذلك- سندرس هنا آلية انهيار هذه الأوساط.

١-٢ آلية انهيار الغازات Mechanism of Breakdown of Gases

عند الضغط ودرجة الحرارة العاديان تكون الغازات عوازل ممتازة. ويكون تيار التوصيل في حدود $10^{-10}\ A/cm^2$. وينتج تيار التوصيل هذا من تأين الهواء من الإشعاع الكوني والمواد المشعة الموجودة في الهواء الجوي والأرض. عند المجالات الأعلى، يمكن أن تكتسب الجسيمات

المشحونة طاقة كافية بين التصادم لتسبب تـأين عنـد الاصـطدام مـع الجزيئـات المتعادلـة. ومـن المعروف أنه أثناء التصادم المرن يفقد الإلكترون طاقة قليلة ويبني بسرعة طاقة حركته والتي تُمَـد بواسطة مجال كهربي خارجي. ومن جهة أخرى، أثناء التصادم المرن، يتحـول جـزء كـبير مـن طاقة الحركة إلى طاقة وضع بتأين الجزيء المصدوم بالإلكترون. التأين بواسطة تـصادم الإلكـترون تحت مجال كهربي قوي هو العملية الأكثر أهمية التي تؤدي إلى انهيار الغازات.

التأين بالإشعاع أو الفوتونات يشمل تفاعـل الإشـعاع مـع المـادة. ويحـدث التـأين الـضوئي photoionization عند امتصاص كمية من طاقـة الإشـعاع بواسـطة ذرة أو جـزيء تتعـدى طاقـة تأينه وتمثل بالآتي:



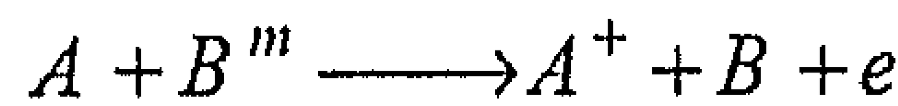
$$A + h\nu \longrightarrow A^{+} + e$$

حيث A تمثل ذرة أو جزيء متعادل في الغاز.

$h\nu =$ طاقة الفوتون.

والتأين الضوئي هو عملية تـأين ثانويـة وهـو أساسـي في آليـة الانهيـار التـدفقي وفي بعـض تفريغات الكورونا corona discharge. إذا كانت طاقة الفوتون أقل من طاقة التأين، فمن الممكن أن تظل ممتصة لترفع من الذرة إلى مستوى طاقة أعلى، وهذا مـا يعـرف باسـم "إثـارة ضـوئية" photoexcitation.

زمن عمر أي عنصر في بعض حالات الإثارة الإلكترونية يمتد إلى ثواني. وهـذه تعـرف باسـم "الحالات شبه المستقرة" metastable وهذه الذرات تعرف باسـم "أشـباه مـستقرة"، وهـي لهـا طاقة وضع عالية نسبياً –لذلك– تكون قادرة على تأين الجسيمات المتعادلة. نفترض أن A هـي الذرة التي ستتأين، B^{m} هي شبه المستقرة فعندما تصطدم B^{m} مع A يمكن أن يحـدث تـأين حسب المعادلة:



$$A + B^{m} \longrightarrow A^{+} + B + e$$

التأين بواسطة التفاعلات شبه المستقرة يحدث بعـد الإثـارة وقـد ثبـت أن هـذه التفـاعلات تكون مسئولة عن التخلف طويل الزمن الملاحظ في بعض الغازات.

التأين الحراري Thermal Ionization

ينطبق مصطلح التأين الحراري عامة على تأين التصادمات الجزيئيـة، الإشـعاع وتـصادمات الإلكترون الإلكترون الذي يحدث في الغازات عند درجات حرارة مرتفعـة. فعنـدما يـسخن الغـاز

إلى درجة حرارة عالية تكتسب بعض جزيئات الغاز طاقة حركة عالية وتأين هذه الجسيمات عالية الطاقة الجسيمات المتعادلة بعد اصطدامها بها وتُحرر إلكترونات. هذه الإلكترونات والجزيئات عالية السرعة الأخرى تصطدم بالتالي مع الجسيمات الأخرى وتحرر مزيد من الإلكترونات. وبذلك يتأين الغاز. في هذه العملية يمكن أن يُعاد اتحاد بعض الإلكترونات مع الأيونات الموجبة ويحولها إلى جزيئات متعادلة. لذلك نصل إلى حالة شرط تحت التوازن الديناميكي الحراري عندما يكون معدل تكون الأيون الجديد مساوياً لمعدل إعادة الاتحاد. وباستخدام هذا الفرض اشتق "ساها" Saha تعبيراً لدرجة التأين β بدلالة ضغط الغاز ودرجة حرارته المطلقة كالتالي:

$$\frac{\beta^2}{1-\beta^2}=\frac{1}{p}\frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h}(KT)^{5/2}e^{-w/KT}$$

أو

$$\frac{\beta^2}{1-\beta^2}=\frac{2.4\times10^{-4}}{p}T^{5/2}e^{-W_i/KT}$$

حيث p = الضغط (Torr).

W_i= طاقة التأين للغاز.

K = ثابت بولتزمان.

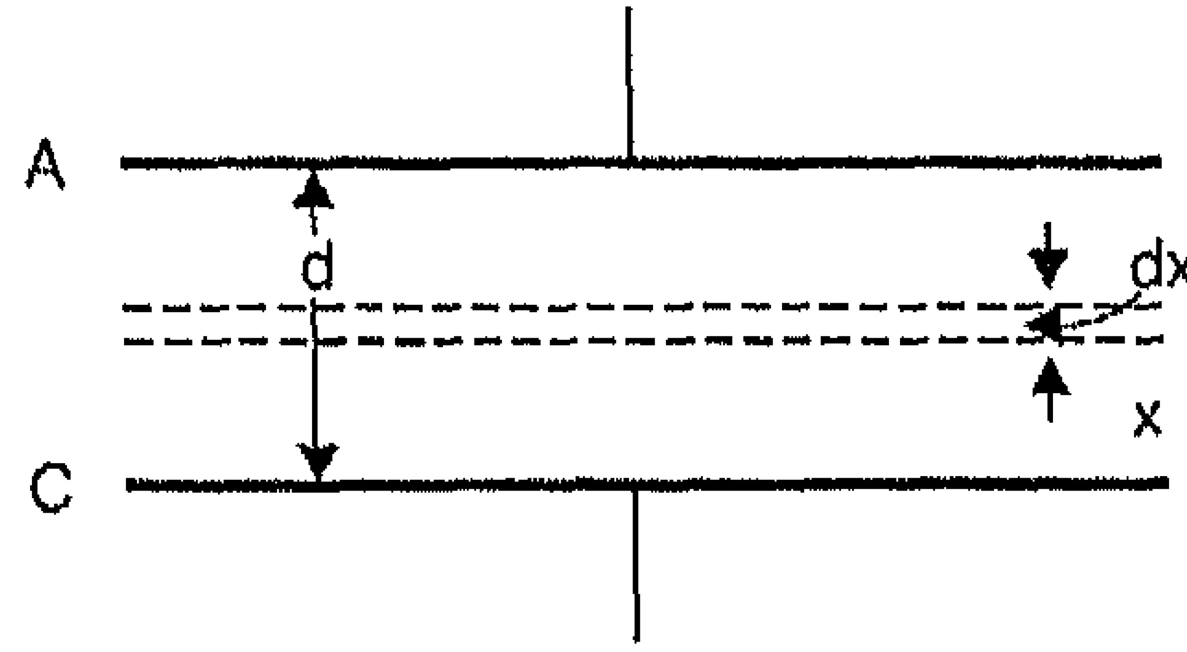
β = النسبة n_i/n ، n_i عدد الجسيمات المتأينة ، n العدد الإجمالي للجسيمات.

وحيث إن β تعتمد على درجة الحرارة فمن الواضح أن درجة التأين تكون مهملة عند درجة حرارة الغرفة. أيضاً، إذا عوضنا عن قيم p ، W_i، K ، T يمكن أن نرى أن التأين الحراري للغاز يصبح ملحوظاً فقط إذا تعدت درجة الحرارة 1000 °K .

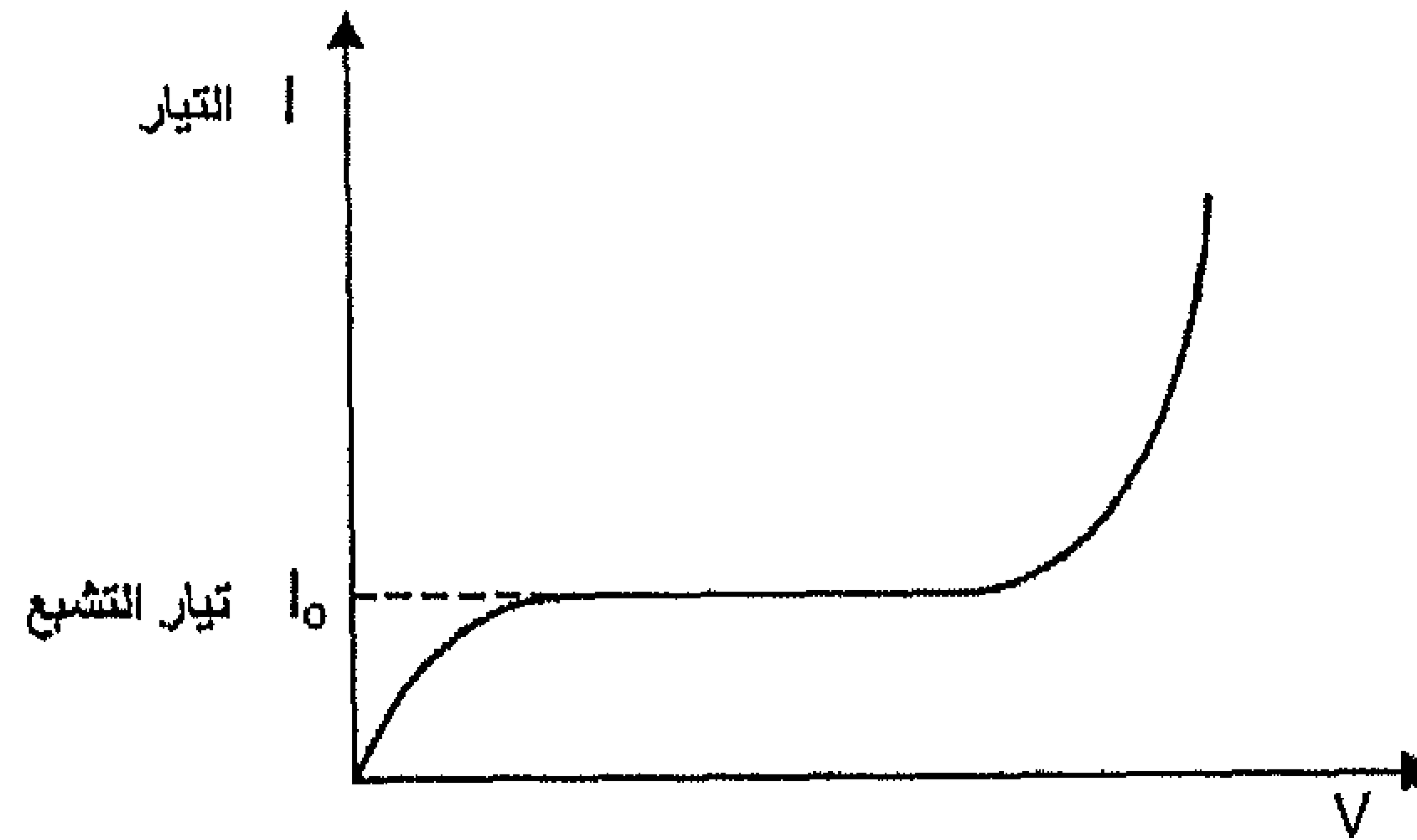
١-٣ معامل تأين تاونسند الأول Townsend's First Ionization Coefficient

نفترض مكثف متوازي الألواح لديه غاز كوسط عازل ولوحيه منفصلين بمسافة d كما هو مبين في الشكل 1.1، عندما لا يكون هناك مجال كهربي بين اللوحين تتواجد حالة التوازن بين حالة توليد الإلكترون والأيون الموجب بسبب عمليات التضائل decay وستضطرب هذه الحالة لحظة التأثير بمجال كهربي عالي. تغير التيار كدالة في الجهد تم دراسته بواسطة تاونسند. وقد وجد أن التيار يزداد أولاً متناسباً مع زيادة الجهد ثم يثبت، عند I_0 التي تقابل تيار التشبع وعند

جهود أعلى يتزايد التيار أسياً. تغير التيار كدالة في الجهد موضح في الشكل 1.2. وترجع الزيادة الأسية في التيار إلى تأين الغاز بواسطة تصادمات الإلكترون. وبزيادة الجهد تزداد V/d ولذلك تُسرع الإلكترونات أكثر وأكثر وبين التصادمات تكتسب طاقة حركة أعلى و-لذلك- يصطدم مزيد من الإلكترونات.



الشكل 1.1: مكثف اللوح المتوازي



الشكل 1.2: تغير التيار كدالة في الجهد

ولشرح الارتفاع الأسي في التيار قدم تاونسند معامل α يعرف باسم "معامل تأين تاونسند الأول" ويعرّف بعدد الإلكترونات المنتجة بواسطة إلكترون لكل وحدة أطوال من المسار في اتجاه المجال. نفترض أن n_0 هو عدد الإلكترونات التي تترك الكاثود وعندما تتحرك هذه خلال مسافة x من الكاثود، تصبح n. والآن عندما تتحرك هذه الإلكترونات التي عددها n خلال مسافة dx تنتج إلكترونات إضافية مقدارها dn بسبب التصادم. لذلك:

$$dn = \alpha n dx$$

أو

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx$$

أو بإجراء التكامل نحصل على:

$$\ln n = \alpha x + A$$

حيث A = ثابت التكامل.

والآن عند $x = 0$ ، $n = n_o$ لذلك:

$$\ln n_0 = A$$

أو

$$\ln n = \alpha x + \ln n_0$$

أو

$$\ln \frac{n}{n_0} = \alpha x$$

وعندما $x = d$ ، $n = n_0 e^{\alpha d}$ لذلك بدلالة التيار فإن:

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

المصطلح $e^{\alpha d}$ يسمى "انهمار الإلكترون" وهو يمثل عدد الإلكترونات الناتجة بإلكترون واحد عند الرحيل من الكاثود إلى الآنود.

١-٤ عمليات الكاثود-التأثيرات الثانوية Cathod Processes-Secondary Effects

يلعب الكاثود دوراً هاماً في تفريغ الغاز بإمداد الإلكترونات للبدء، التزود وإكمال التفريغ. في المعدن -تحت الظروف العادية- لا يسمح للإلكترونات بمغادرة السطح حيث إنها مربوطة معاً بسبب القوة الكهروستاتيكية بين الإلكترونات والأيونات في الشبيكة. الطاقة المطلوبة لانبعاث الإلكترون من مستوى فيرمي تعرف باسم "دالة الشغل" وهي خاصة للمادة المعطاة. وهناك طرق متعددة لإمداد هذه الطاقة لتحرير الإلكترون.

الانبعاث الثرميوني Thermoionic Emission

عند درجة حرارة الغرفة لا يكون لإلكترونات التوصيل بالمعدن أي طاقة حرارية كافية لمغادرة السطح. ومع ذلك، فإذا سُخنت المعادن إلى درجة حرارة 1500 °K وما فوقها، فإن الإلكترونات ستستقبل طاقة من الشبيكة الحرارية العنيفة بتردد يكفي لعبورها حاجز السطح تاركاً المعدن. بعد بحوث مكثفة لانبعاث الإلكترون من المعادن عند درجة حرارة عالية، طور ريتشاردسون Richardson تعبيراً لكثافة تيار التشبع J_s كالآتي:

$$J_s = \frac{4\pi m_e K^2}{h^3} T^2 e^{W_a/KT} \ \mathrm{A/m^2}$$

والآن نفترض أن:

$$A = \frac{4\pi m_e K^2}{h^3}$$

وبذلك تصبح المعادلة كالآتي:

$$J_s = A T^2 e^{-W_a/KT}$$

والتي تبين أن كثافة تيار التشبع تزداد مع النقص في دالة الشغل والزيادة في درجة الحرارة وبالتعويض عن قيم كل من m_e ، K ، h نجد أن $A = 120\times10^4\ \mathrm{A/m^2\ Kelv^2}$. ومع ذلك، فإن القيمة المتحصل عليها عملياً لـ A تكون أقل من ما حصلنا عليه من المعادلة السابقة. ويرجع اختلاف قيم A لعيوب السطح وشوائب معدنه. ويؤثر الغاز الموجود بين الإلكتروديـن على الانبعاث الثرميوني حيث إن الغاز يمكن أن يمتص بواسطة المعدن ويمكن أيضاً أن يدمر سطح الإلكترود بسبب الاصطدام المستمر للأيونات. أيضاً، يُلاحظ أن دالة الشغل قد تنخفض بسبب التمدد الحراري لتركيب البلورة. وعادة ما تستخدم المعادن ذات دالة الشغل المنخفضة ككاثود للانبعاث الثرميوني.

انبعاث المجال — Field Emission

إذا أثر مجال كهربي قوي بين الإلكترودات، فإن دالة الشغل المؤثرة للكاثود تنخفض وتعطى بالآتي:

$$W' = W - \varepsilon^{3/2} E^{1/2}$$

وتعطى كثافة تيار التشبع حينئذ بالآتي:

$$J_s = A T^2 e^{-W'/KT}$$

وهذا ما يعرف باسم "ظاهرة سكوتكي" Schottky effect وتسري جيداً عبر مدى واسع من درجات الحرارة والمجالات الكهربية. وقد أظهرت الحسابات أنه عند درجة حرارة الغرفة يظل الانبعاث الإجمالي منخفضاً حتى لو أثرت مجالات في حدود 10^5 V/cm . ومع ذلك، إذا كان المجال في حدود 10^7 V/cm ، فإن تيار الانبعاث الملاحظ يكون أكبر بكثير من القيمة الثرميونية المحسوبة. ويمكن شرح ذلك فقط من خلال ميكانيكا الكم عند ميول السطح العالية هذه، يصبح حاجز سطح الكاثود رفيع جداً ويحدث نفق كم الإلكترونات الذي يؤدي إلى انبعاث مجال حتى عند درجة حرارة الغرفة.

انبعاث الإلكترون بواسطة الأيون الموجب وقذف الذرة المثارة

Electron Emission by Positive Ion & Excited Atom Bombardment

يمكن أن تنبعث الإلكترونات بواسطة قذف الأيون الموجب على سطح الكاثود. وهذا ما يعرف باسم "الانبعاث الثانوي". ولزيادة تأثير الانبعاث الثانوي، يجب أن يحظى الأيون الموجب بطاقة أكثر من ضعف دالة الشغل للمعدن حيث إن إلكترون واحد سيعادل الأيون الموجب

المقذوف وسيتحرر الإلكترون الآخر. إذا كان W_k، W_p هما طاقتي الحركة والوضع على الترتيب للأيون الموجب فإنه لحدوث الانبعاث الثانوي يجب أن يكون $W_k + W_p \geq 2W$. انبعاث الإلكترون بواسطة الأيون الموجب هو العملية الثانوية الأساسية في آلية تفريغ شرارة تاونسند. الذرات المثارة المتعادلة أو الجزيئات [شبه المستقرة] الساقطة على سطح الكاثود تكون قادرة أيضاً على تحرير إلكترونات من السطح.

١-٥ معامل تأين تاونسند الثاني Townsend Second Ionization Coefficient

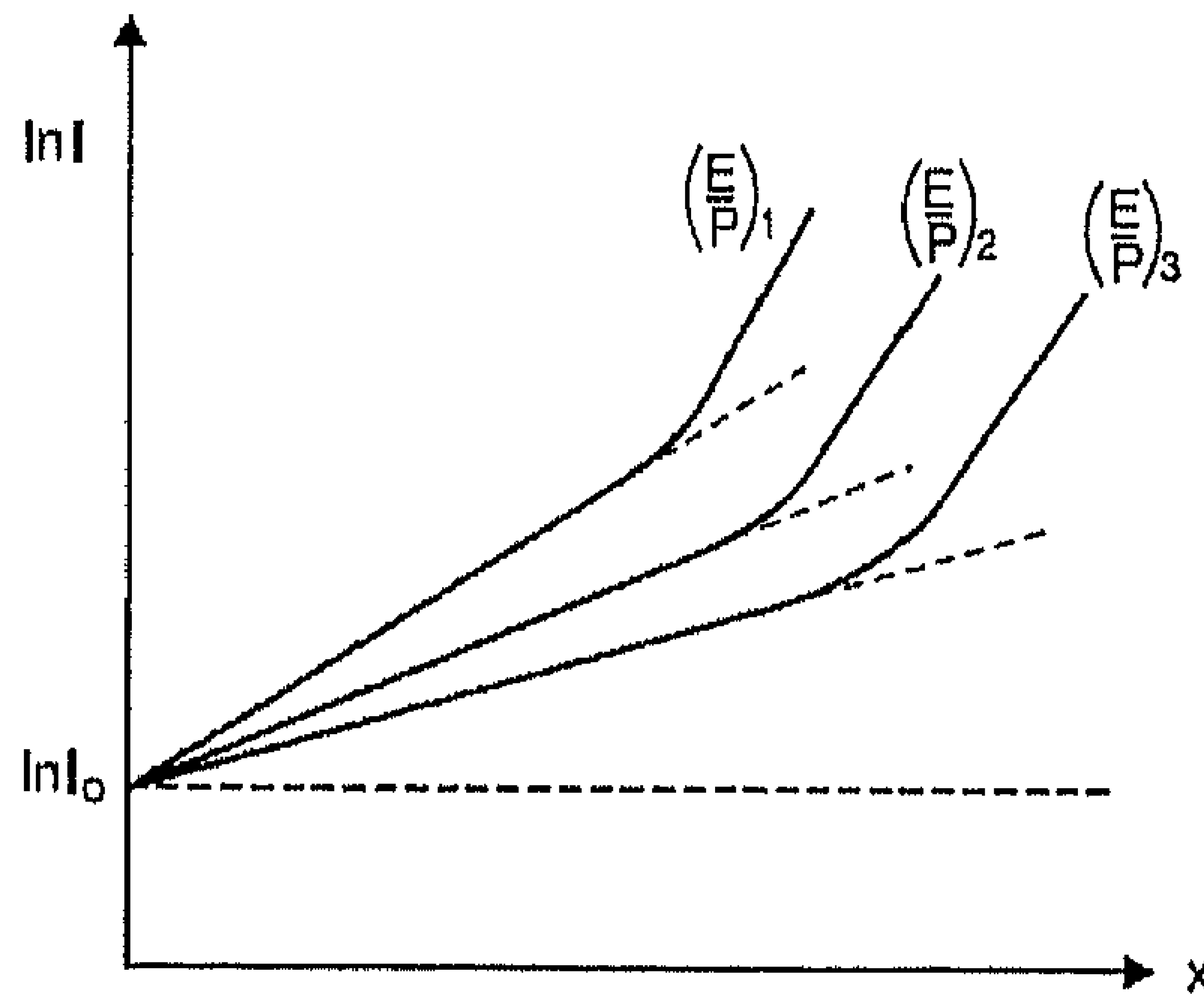
من المعادلة:

$$I = I_0 e^{\alpha x}$$

وبأخذ لوغاريتم الطرفين نحصل على:

$$\ln I = \ln I_0 + \alpha x$$

وهي معادلة خط مستقيم ميله α وتقاطعه مع الرأسي $\ln I_0$ كما هو مبين في الشكل 1.3 إذا حفظت E ثابتة لضغط معطى p.



الشكل 1.3: تغير تيار الثغرة مع تباعد الإلكترود في E منتظم

وقد لاحظ تاونسند في أبحاثه المبكرة أن التيار في ثغرة ألواح متوازية يزداد بسرعة أكبر مع الزيادة في الجهد مقارنة لما هو معطى بالمعادلة السابقة. ولشرح هذا الابتعاد عن الخطية، اقترح تاونسند أنه يجب أن يكون هناك آلية ثانية تؤثر على التيار. وقد سَلّم بضرورة وجود تيار إضافي يرجع لوجود أيونات موجبة وفوتونات. الأيونات الموجبة ستحرر إلكترونات بالتصادم مع جزيئات الغاز وبالقذف على الكاثود. وبالمثل ستحرر الفوتونات أيضاً إلكترونات بعد التصادم

مع جزيئات الغاز ومن الكاثود بعد تصادم الفوتون. والآن دعنا نفترض ظاهرة التفريغ الذاتي المستمر حيث تتحرر الإلكترونات من الكاثود بقذف الأيون الموجب.

دع n_0 هي عدد الإلكترونات المتحررة من الكاثود بواسطة الإشعاع فوق البنفسجي، n_+ هي عدد الإلكترونات المتحررة من الكاثود بسبب قذف الأيون الموجب، n هي عدد الإلكترونات الواصلة للآنود. نفترض أن ν المعروفة باسم "معامل تأين تاونسند الثاني" ويعرَّف بعدد الإلكترونات المتحررة من الكاثود لكل أيون موجب ساقط، فإن:

$$n = (n_0 + n_+) e^{\alpha d}$$

والآن فإن العدد الكلي من الإلكترونات المتحررة من الكاثود يكون $(n_0 + n_+)$ وتلك التي تذهب إلى الآنود هي n –لذلك– فإن عدد الإلكترونات التي تتحرر من الغاز تساوي $n - (n_0 + n_+)$، ومقابل كل إلكترون متحرر من الغاز سيكون موجود أيون موجب واحد وبفرض أن كل أيون موجب يتحرر ν إلكترون مؤثر من الكاثود فإن:

$$n_+ = \nu\left[n - (n_0 + n_+)\right]$$

أو

$$n_+ = \nu n - \nu n_0 - \nu n_+$$

أو

$$(1+\nu) n_+ = \nu (n - n_0)$$

أو

$$n_+ = \frac{\nu (n - n_0)}{1+\nu}$$

وبالتعويض عن n_+ في معادلة n نحصل على:

$$n = \left[n_0 + \frac{\nu(n - n_0)}{1+\nu}\right] e^{\alpha d}$$

$$= \frac{(1+\nu) n_0 + \nu n - \nu n_0}{1+\nu} e^{\alpha d} = \frac{n_0 + \nu n}{1+\nu} e^{\alpha d}$$

أو

$$(n + \nu n) = n_0 e^{\alpha d} + \nu n e^{\alpha d}$$

أو

$$n + \nu n - \nu n e^{\alpha d} = n_0 e^{\alpha d}$$

أو

$$n\left[1 + \nu - \nu e^{\alpha d}\right] = n_0 e^{\alpha d}$$

أو

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 + \nu\left(1 - e^{\alpha d}\right)} = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \nu\left(e^{\alpha d} - 1\right)}$$

وبدلالة التيار يكون:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1-\nu\left(e^{\alpha d}-1\right)}$$

وقد اشتق تاونسند معادلة للتيار كالآتي:

$$I = I_0 \frac{(\alpha-\beta)e^{(\alpha-\beta)d}}{\alpha-\beta e^{(\alpha-\beta)d}}$$

حيث β = عدد أزواج الأيونات الناتجة بالأيون الموجب الراحل في مسار طوله 1 cm في اتجاه المجال.

وكان اقتراح تاونسند الأصلي أن الأيون الموجب بعد التصادم مع جزيء الغاز وتحرير إلكترون يصبح غير مناسب كأيون فقد طاقته بسرعة في تصادم مرن ويكون غير قادر على كسب طاقة كافية من المجال الكهربي ليسبب تأين عند التصادم مع جزيء غاز أو ذرة.

عملياً فإن الأيونات الموجبة، الفوتونات وشبه المستقرة يمكنها جميعاً المساهمة في عملية التأين، اعتماداً على الشروط التجريبية. ويمكن تواجد أكثر من آلية واحدة تنتج تأين ثانوي في ثغرة التفريغ –ولذلك– فمن المعتاد التعبير عن تأثير التأين الثانوي الصافي بواسطة معامل واحد ν وتمثيل التيار بواسطة المعادلة السابقة مع الاحتفاظ بأن ν يمكن أن تمثل واحدة أو أكثر من الآليات العديدة الممكنة.

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \ldots$$

ويجب ملاحظة أن قيمة ν تعتمد على دالة الشغل للمادة. فإن كانت دالة الشغل لسطح الكاثود منخفضة، فإنه تحت نفس الشروط التجريبية سينتج انبعاث أكبر. أيضاً، فإن قيمة ν تكون صغيرة نسبياً عند القيمة المنخفضة لـ E/p وستزداد بزيادة E/p. وهذا لأنه عند القيم المرتفعة لـ E/p، سيكون هناك عدد كبير من الأيونات الموجبة والفوتونات ذات طاقة كبيرة كافية لإحداث التأين عند الاصطدام بسطح الكاثود. ويجب ملاحظة أن تأثير ν على آلية الانهيار يكون مقيداً بآلية انهيار تاونسند أي بانهيار الضغط المنخفض فقط.

١-٦ آلية انهيار تاونسند Townsend Breakdown Mechanism

عند زيادة الجهد بين الآنود والكاثود فإن التيار عند الآنود يعطى بالآتي [كما سبق]:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1-\nu\left(e^{\alpha d}-1\right)}$$

ويصبح التيار لانهائي إذا كان:

$$1-\nu\left(e^{\alpha d}-1\right)=0$$

أو

$$\nu\left(e^{\alpha d}-1\right)=1$$

أو

$$\nu e^{\alpha d}\approx 1$$

حيث عادة

$$e^{\alpha d}>>1$$

التيار في الآنود يساوي التيار في الدائرة الخارجية. نظرياً يصبح التيار كبير كبراً لانهائياً عند الشرط المذكور بأعلى ولكن عملياً يكون محدوداً بواسطة مقاومة الدائرة الخارجية وعملياً بهبوط الجهد في القوس. الشرط $\nu e^{\alpha d}=1$ يعرف "شرط بداية الشرر" ويعرف بمعيار تاونسند لتكوّن الشرارة أو معيار انهيار تاونسند.

باستخدام المعادلة السابقة تكون الشروط الثلاثة التالية ممكنة:

١. $\nu e^{\alpha d}=1$: عدد أزواج الأيونات الناتجة في الثغرة بواسطة مرور انهمار إلكترونات القوس يكون كبير بدرجة كافية والأيونات الموجبة الناتجة عند قذف الكاثود تكون قادرة على تحرير إلكترون ثانوي واحد وبذلك تسبب تكرار عملية الانهمار. ويقال أن التفريغ عندئذ يكون ذاتي الاستمرار حيث سيبقى التفريغ نفسه حتى إذا تم إزالة المصدر الذي ينتج I_0.
لذلك، فإن الشرط $\nu e^{\alpha d}=1$ يُعرَّف "شرط بداية الشرر".

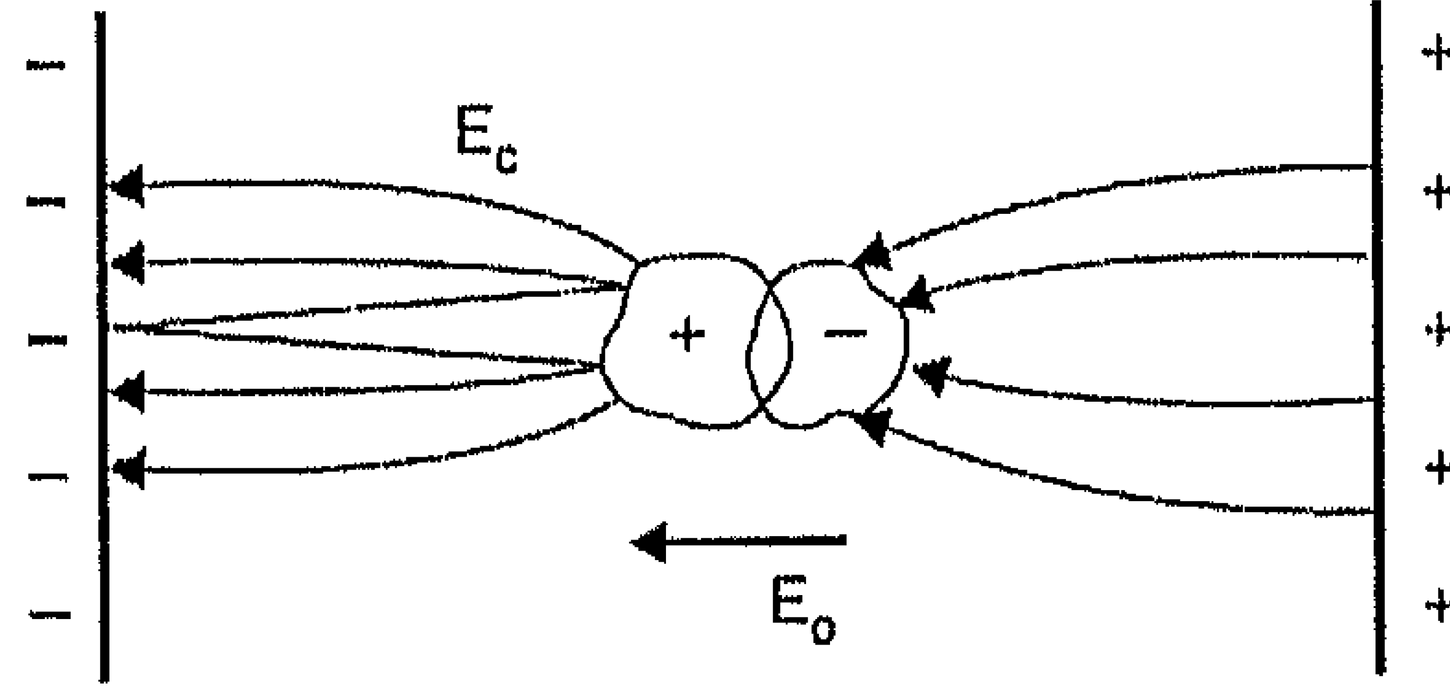
٢. $\nu e^{\alpha d}>1$: هنا يكون التأين الناتج بواسطة الانهمار المتتالي تراكمي. وينمو تفريغ الشرر بسرعة أكبر بزيادة تعدي $\nu e^{\alpha d}$ الوحدة.

٣. $\nu e^{\alpha d}<1$: وهنا يكون التيار I ليس ذاتي الاستمرار، أي عند إزالة مصدر التيار I_0 يتوقف التدفق.

١-٧ آلية المجرى أو كانال لتكوّن الشرر Streamek or Kanal Mechanism of Spark

نعرف أن الشحنات بين الإلكترودات المنفصلة بمسافة d تزداد بعامل $e^{\alpha d}$ عندما يكون المجال بين الإلكترودات منتظم. ويسري ذلك فقط إذا افترضنا أن المجال $E_0=V/d$ لا يتأثر بواسطة شحنات الفراغ للإكترونات والأيونات الموجبة. وقد لاحظ رايثر Raether أنه إذا كان تركيز الشحنة أعلى من 10^6 وأقل من 10^8 فإن نمو الانهمار يضعف أي أن $dn/dx<e^{\alpha d}$. وعندما يتعدى التركيز 10^8، يتبع تيار الانهمار بارتفاع حاد في التيار ويحدث انهيار في الثغرة.

ضعف الانهمار عند تركيز أقل والنمو السريع للانهمار عند تركيز عالي نُسْبَ لتعديلات المجال الكهربي E_0 الذي يرجع إلى مجال شحنة الفراغ.



الشكل 1.4: توزيع المجال بسبب شحنة الفراغ

الشكل 1.4 يبين المجال الكهربي حول انهمار عندما يتكون بطول الثغرة والمجال المحصل أي تراكب مجال شحنة الفراغ والمجال الأصلي E_0. وحيث إن الإلكترونات لها حركية عالية ، فإن شحنة الفراغ عند قمة الانهمار تعتبر سالبة ويفترض أن تكون مركزة داخل حجم كروي. ويمكن أن نرى من الشكل 1.4 أن المجال عند قمة الانهمار قوي. والمجال بين مركزي الشحنة المفروضتان أي الإلكترونات والأيونات الموجبة منخفض حيث إن المجال الناشئ عن مراكز الشحنة يضاد المجال الرئيسي ومرة أخرى المجال بين مركز شحنة الفراغ الموجبة والكاثود تقوى حيث يساعد مجال شحنة الفراغ المجال الرئيسي E_0 في هذه المنطقة. وقد لوحظ أنه إذا كان عدد حاملات الشحنة يتعدى 10^6 ، فإن اضطراب المجال يصبح ملحوظاً. وإذا كان التشوه أو اضطراب المجال 1% ، فإنه سوف يؤدي إلى مضاعفة الانهمار ولكن عندما يكون تشوه المجال قريباً من قمة الانهمار فقط، فإنه لا يكون لديه أي أهمية على ظاهرة التفريغ. ومع ذلك ، إذا تعدت حاملات الشحنة 10^8 ، فإن مجال شحنة الفراغ تصبح غالباً بنفس مقدار المجال الرئيسي E_0 ومن هنا يمكن أن تؤدي إلى بدء التدفق. ولذلك، فإن مجال شحنة الفراغ يلعب دوراً هاماً جداً في آلية التفريغ الكهربي في ثغرة غير منتظمة.

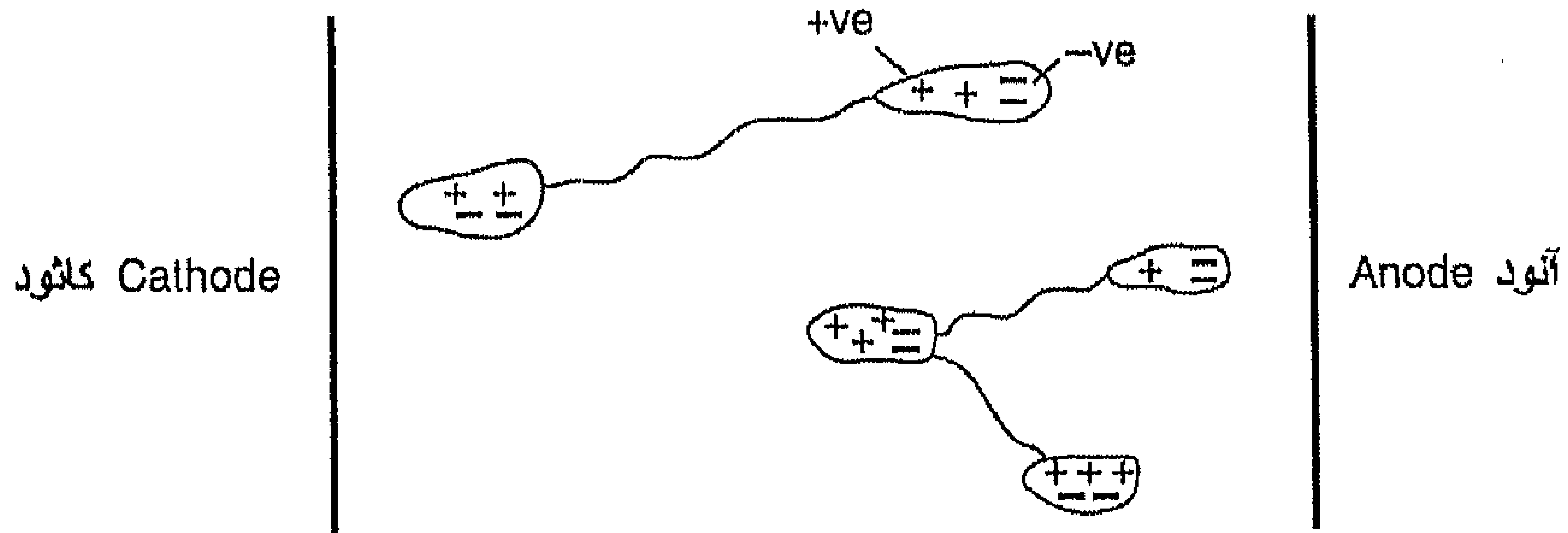
وقد اقترح تاونسند أن تفريغ الشرارة الكهربية يرجع لتأين جزيء الغاز بواسطة اصطدام الإلكترون وتحرر إلكترونات من الكاثود بسبب قذف الأيون الموجب عند الكاثود. وطبقاً لهذه النظرية ، فإن التأخير الزمني المكوّن للشرارة يجب أن يكون على الأفضل مساوياً لزمن انتقال الإلكترون t_r. عند ضغوط قريبة من الضغط الجوي وفوق $p \cdot d > 10^3$ Torr.cm ، وُجد أن زمن التأخير المحدد تجريبياً أقصر كثيراً من t_r. دراسة صور الانهمار أظهرت أنه تحت شروط

معينة فإن شحنة الفراغ الناشئة في أي انهمار تكون قادرة على تحويل الانهمار إلى قنوات تأين تعرف بـ"المجاري" [مسالك] Streamer والتي تؤدي إلى التطور السريع للانهيار. ولوحظ أيضاً من خلال القياسات أن التحول من الانهمار إلى المجرى عامة يحدث عندما تصل الشحنة داخل قمة الانهمار إلى قيمة حرجة تساوي:

$$n_0 e^{\alpha x} \approx 10^8 \text{ or } \alpha x_c \approx 18 \text{ to } 20$$

حيث x_c = طول مسار الانهمار في اتجاه المجال عندما يصل إلى الحجم الحرج. إذا كان طول الثغرة $d < x_c$ يكون بدء المجرى غير محتمل.

التأخر الزمني القصير المرتبط بتطور التفريغ قاد رايثر ومستقلاً كل من ميك Meek وميك ولويب Loeb إلى تقديم نظرية المجرى أو آلية كانال Kanal mechanism لتكون الشرر، والتي فيها تنتج الآلية الثانوية من التأين الضوئي لجزيء الغاز ويكون مستقلاً عن الإلكترودات.



الشكل 1.5: تكون الانهمار الثانوي بواسطة الإلكترونات الضوئية

وقد افترض "ريثر" و"ميك" أنه عندما يصل الانهمار في الثغرة إلى حجم حرج معين فإن مجال شحنة الفراغ المتحد مع المجال المؤثر الخارجي E_0 يؤدي إلى شدة التأين وإثارة جسيمات الغاز أمام مقدمة الانهمار. ويوجد إعادة اتحاد للإلكترونات والأيونات الموجبة يؤدي إلى توليد فوتونات وهذه الفوتونات بالتالي تولد إلكترونات ثانوية بواسطة عملية التأين الضوئي. وهذه الإلكترونات تحت تأثير المجال الكهربي تتحول إلى انهمار ثانوي كما هو موضح في الشكل 1.5. وحيث إن الفوتونات ترحل بسرعة الضوء، فإن العملية تؤدي إلى إتاحة قناة توصيل عبر الثغرة.

وبعد عدة بحوث تجريبية طوّر ريثر علاقة وضعية لمعيار شرارة المجرى على الصيغة التالية:

$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c + \ln \frac{E_r}{E_0}$$

حيث $E_r =$ المجال نصف القطري بسبب شحنة الفراغ.

$E_0 =$ المجال المؤثر الخارجي.

والآن لتحول الانهمار إلى مجرى streamer $E_r \approx E$ لذلك:

$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c$$

ولثغرة مجال منتظم، يتم الحصول على جهد الانهيار خلال آلية المجرى بفرض أن الانتقال من الانهمار إلى المجرى يحدث عند مجرد عبور الانهمار من الثغرة. وبذلك تصبح المعادلة السابقة كالآتي:

$$\alpha d = 17.7 + \ln d$$

وعندما يكون الطول الحرج $x_c \geq d$ يحدث أدنى انهيار بواسطة آلية المجرى. ويعطي الشرط $x_c = d$ القيمة الأصغر لـ α لإنتاج انهيار مجرى.

وقد اقترح ميك Meek أن الانتقال من الانهمار إلى المجرى يحدث عندما يحصل المجال نصف القطري حول شحنة الفراغ الموجبة في انهمار إلكترون على قيمة في حدود المجال المؤثر الخارجي. وقد بين أن قيمة المجال نصف القطري يمكن الحصول عليها باستخدام المعادلا

$$E_r = 5.3 \times 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \text{ Volts/cm}$$

حيث $x =$ المسافة (cm) التي تقدمها الانهمار.

$E_r =$ قيمة المجال نصف القطري radial field.

$p =$ ضغط الغاز (torr).

$\alpha =$ معامل تاونسند للتأين بالإلكترونات المقابل للمجال المؤثر E.

ويفترض أن جهد الانهيار الأدنى يقابل الشرط عندما يعبر الانهمار ثغرة طولها d ومجال شحنة الفراغ E_r تقترب من المجال المؤثر الخارجي أي عند $x = d$ ، $E_r = E$. وبالتعويض عن هذه القيم في المعادلة السابقة يكون لدينا:

$$E = 5.3 \times 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha d}}{(d/p)^{1/2}}$$

وبأخذ اللوغاريتم ln لكلا الطرفين، نحصل على:

$$\ln E = -14.5 + \ln\alpha - \frac{1}{2}\ln\frac{d}{p} + \alpha d$$

$$\ln E - \ln p = -14.5 + \ln\alpha - \ln p - \frac{1}{2}\ln\frac{d}{p} + \alpha d$$

أو

$$\ln\frac{E}{p} = -14.5 + \ln\frac{\alpha}{p} - \frac{1}{2}\ln\frac{d}{p} + \alpha d$$

وتستخدم القيم المحددة تجريبياً لـ α/p ، E/p المقابلة لحل المعادلة السابقة باستخدام طريقة المحاولة والخطأ trial and error. حيث يتم اختيار قيم α/p التي تقابل E/p عند ضغط معطى حتى تتحقق المعادلة.

١-٨ جهد الشرر-قانون باشين The Sparking Potential-Paschen's Law

معيار تاونسند:

$$\nu\left(e^{\alpha d} - 1\right) = 1$$

يمكننا من تقدير جهد انهيار الثغرة باستخدام القيم المناسبة لـ α/p ، ν المقابلة لقيم E/p عندما يكون التيار منخفضاً بدرجة لا تدمر الكاثود وأيضاً تشوه شحنة الفراغ أقل ما يمكن. ونحصل على توافق متقارب للقيم المحسوبة وتلك المحددة تجريبياً عندما تكون الثغرات قصيرة أو طويلة والضغط منخفض نسبياً.

ويمكن اشتقاق علاقة بين جهد الانهيار لثغرات مجال منتظم كدالة في طول الثغرة وضغط الغاز من معادلة البدء وذلك بالتعبير عن معامل التأين α/p كدالة في شدة المجال E وضغط الغاز p كالآتي:

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

وبالتعويض، نحصل على:

$$e^{f(E/p)pd} = \frac{1}{\nu} + 1$$

وبأخذ ln الطرفين، نحصل على:

$$f\left(\frac{E}{p}\right)pd = \ln\left(\frac{1}{\nu} + 1\right) = K \text{ say}$$

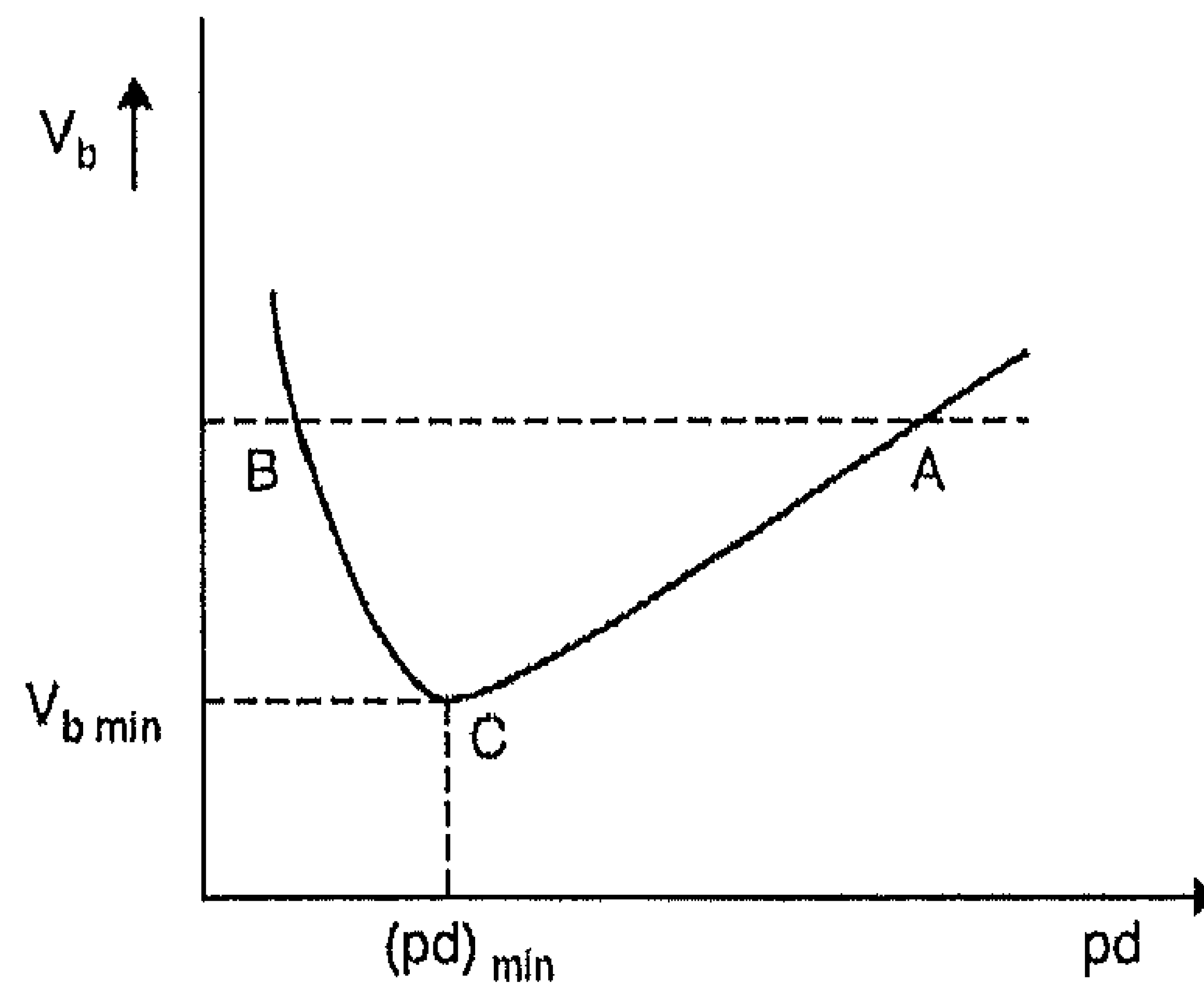
ولمجال منتظم $E = V_b/d$ فإن:

$$f\left(\frac{V_b}{pd}\right) \cdot pd = K$$

أو
$$f\left(\frac{V_b}{pd}\right)=\frac{K}{pd}$$

أو
$$V_b = F(p\cdot d)$$

وهذا هو قانون باسشين وهو يبين أن جهد الانهيار لثغرة مجال منتظم هو دالة وحيدة unique function في حاصل ضرب ضغط الغاز وطول الثغرة لغاز ومادة إلكترود معينان. ولا يعني القانون أن جهد الانهيار يتناسب طردياً مع حاصل الضرب pd ومع ذلك وجد أنه بالنسبة لبعض مناطق حاصل الضرب pd تكون العلاقة خطية أي أن جهد الانهيار يتغير خطياً مع حاصل الضرب pd. ويوضح الشكل 1.6 التغير عبر مدى كبير.



الشكل 1.6: منحنى قانون باسشين

مقارنة قانون باسشين ومعيار تاونسند لجهد الشرارة

Paschen's Law & the Townsend's Criterion for Spark Potential

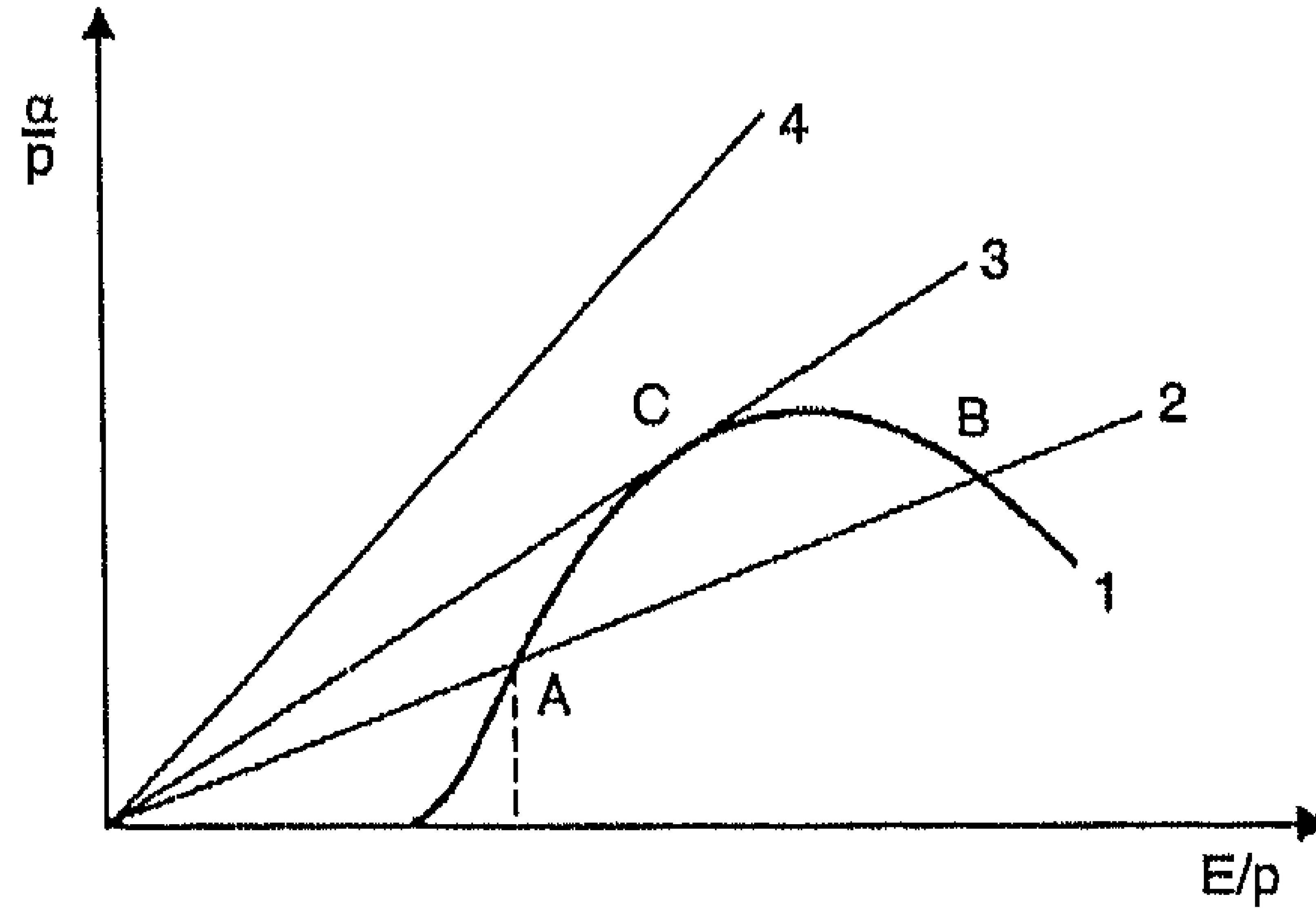
نرسم العلاقة المتحصل عليها من التجارب بين معامل التأين α/p وشدة المجال $f(E/p)$ لغاز معطى. الشكل 1.7 يوضح ذلك.

الجدول 1.1 يبين القيم المتحصل عليها من القياسات لكل من pd ، V_b لبعض الغازات.

١-٩ ظاهرة بيننج **Penning Effect**

لا يسري قانون باسشين جيداً للكثير من مخاليط الغازات. والمثال النموذجي هو مخلوط الأرجون والنيون، حيث نسبة مئوية صغيرة من الأرجون في النيون تخفض بشكل جيد متانة النيون النقي. وفي الحقيقة، فإن متانة العزل الكهربي تكون أصغر من متانات العزل الكهربي لكل من

النيون أو الأرجون النقي. وانخفاض متانة العزل ترجع إلى حقيقة أن المرحلة الأكثر انخفاضاً للنيون تكون شبه مستقرة ويكون جهد إثارتها 16 eV حوالي 0.9 eV أكبر من جهد تأين الأرجون. ولدى الذرات شبه المستقرة عمر طويل في غاز النيون، وعند اصطدام ذرات الأرجون يكون هناك احتمالاً كبيراً جداً لتأينها. وهذه الظاهرة تعرف باسم "ظاهرة بيننج".



الشكل 1.7: العلاقة بين معيار تاونسند لشرارة = k ومعيار باسشين

الجدول 1.1: أدنى ثوابت شرر لغازات مختلفة

الغاز	$(pd)_{min}$	$(V_b)_{min}$ [فولت]
هواء	0.55	352
نتروجين	0.65	240
هيدروجين	1.05	230
SF_6	0.26	507
CO_2	0.57	420
O_2	0.70	450
نيون	4.00	245
هليوم	4.00	155

١-١٠ تفريغات الكورونا Corona Discharges

إذا كان المجال الكهربي منتظماً وإذا تزايد المجال تدريجياً -عند بدء التأين المطلوب قياسه- يؤدي التأين إلى انهيار كامل للثغرة. ومع ذلك، ففي المجالات غير المنتظمة، قبل حدوث

الشرارة أو انهيار الوسط، يوجد كثير من المظاهر على هيئة تفريغات مرئية ومسموعة. وتعرف هذه التفريغات بـ"تفريغات الكورونا". وفي الحقيقة تعرَّف الكورونا بتفريغ كهربي ذاتي-الدوام فيه يتمركز تأين المجال الشديد عبر جزء من المسافة فقط [مجال غير منتظم] بين الإلكترودات. والظاهرة ذات أهمية خاصة في هندسة الجهد العالي حيث إن معظم المجالات المتلاقية تكون مجالات غير منتظمة، طبعاً إذا لم تكن بعض سمات التصميم قد تم وضعها لجعل المجال منتظماً. والكورونا مسئولة عن فقد القدرة وتداخل خطوط القدرة مع خطوط الاتصالات كما أن تردد الكورونا يقع بين 20 Hz إلى 20 kHz . وهذا يؤدي أيضاً إلى تدهور العزل بواسطة الفعل المشترك لأيونات الشحنة التي تقذف السطح وفعل المركبات الكيميائية التي تتكون بواسطة تفريغ الكورونا.

عندما يؤثر جهد أعلى من الجهد الحرج بين سلكين لا معين متوازيين فإن التوهج يكون منتظم، وبعد برهة قصيرة من الزمن، تتكون محزات حمراء أو خصلات بطول السلك، بينما حول سطح السلك يتواجد وهج أبيض مائل للزرقة. وإذا فحصنا الموصلات من خلال ستروبوسكوب، بحيث نرى دائماً سلك واحد عند نصف معطى من الموجة، نلاحظ أن الخصلات الحمراء أو المحزات تتكون عندما يكون الموصل سالب والتوهج الأبيض المائل للزرقة يظهر عندما يكون الموصل موجب. الكورونا a.c التي تظهر خلال الاستروبوسكوب لها نفس مظهر كورونا التيار المستمر. وعند بدء ظاهرة الكورونا تسمع ضوضاء هامسة ويتكون غاز الأوزون والذي يمكن الكشف عنه بواسطة رائحته المميزة.

وعندما يقابل الجهد المؤثر جهد التمزيق الحرج، تبدأ ظاهرة الكورونا ولكنها تكون غير مرئية لأن الأيونات المشحونة في الهواء يجب أن تستقبل بعض الطاقة المحددة لتسبب مزيداً من التأين بالاصطدام. بالنسبة للمجال نصف القطري، يجب أن يصل ميل g_v عند سطح الموصل ليحدث ميل g_0 عند مسافة محددة بعيداً عن سطح الموصل. المسافة بين g_0 ، g_v تسمى "مسافة الطاقة". وحسب بيك Peek فإن هذه المسافة تساوي $r+0.301\sqrt{r}$ لموصلين متوازيين، $r+0.308\sqrt{r}$ لموصلين متحدي المركز. من ذلك يتضح أن g_v ليست ثابتة مثل g_0 ، وتكون دالة في حجم الموصل.

شدة المجال الكهربي لسلكين متوازيين يعطى كالتالي:

$$E = 30\left(1+\frac{0.301}{\sqrt{r\delta}}\right)\delta \text{ kV/cm}$$

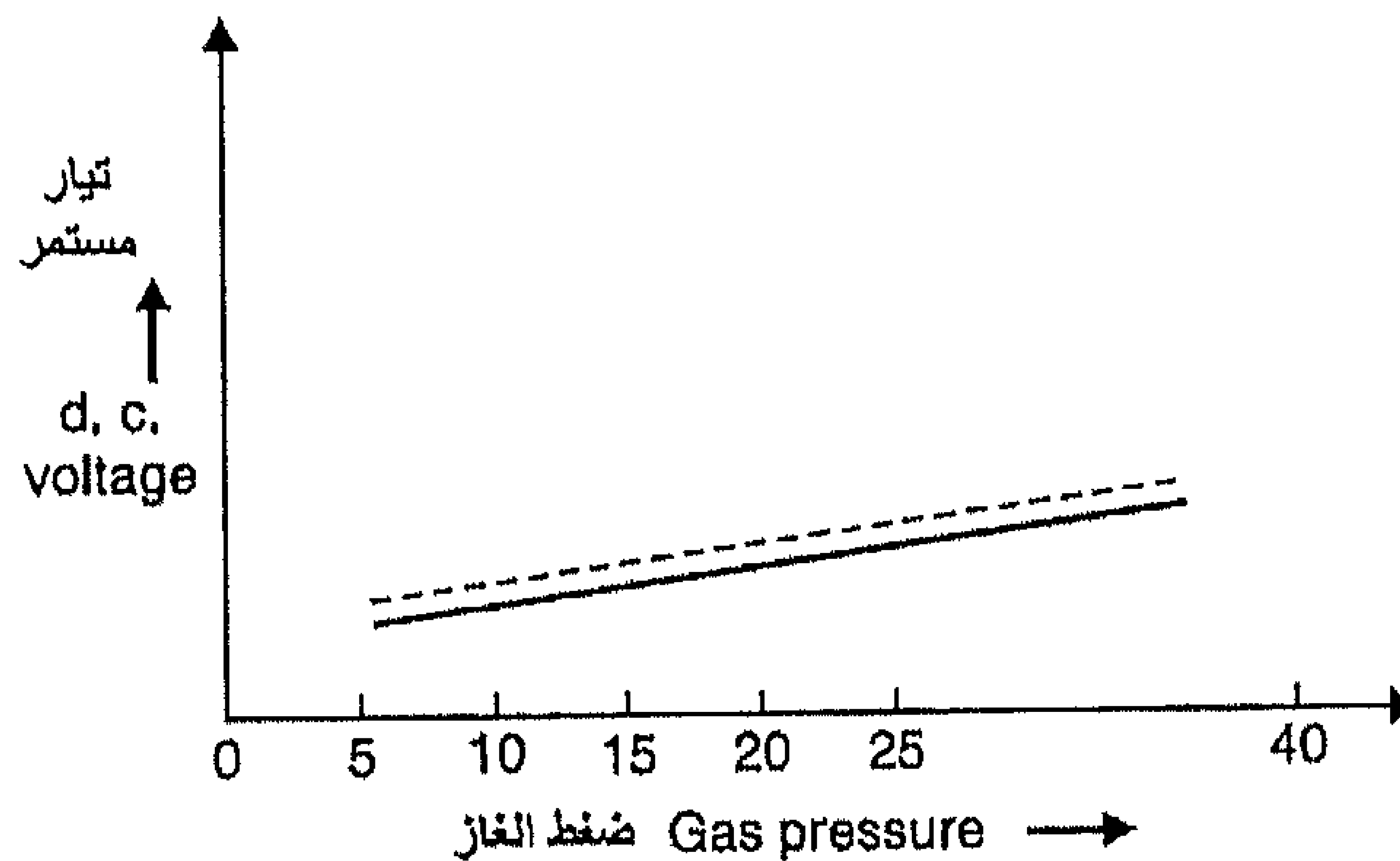
وبالنسبة لأسلاك متحدة المركز:

$$E = 30\left(1+\frac{0.308}{\sqrt{r\delta}}\right)\delta \text{ kV/cm}$$

أظهرت الأبحاث مع ثغرات المستوى–النقطة في الهواء أنه عندما تكون النقطة موجبة، فإن تيار الكورونا يزداد بثبات مع الجهد. وعند جهد عالي، يزداد تكبير التيار بسرعة مع الجهد حتى تيار حوالي 10^{-7} A، والذي بعده يصبح التيار نبضي مع تردد تكرار حوالي 1 kHz يتكون من دفعات صغيرة. ويعرف هذا الشكل من الكورونا بـ"الكورونا الدفعية". ثم يزداد التيار المتوسط بثبات مع الجهد المؤثر، ويؤدي إلى الانهيار.

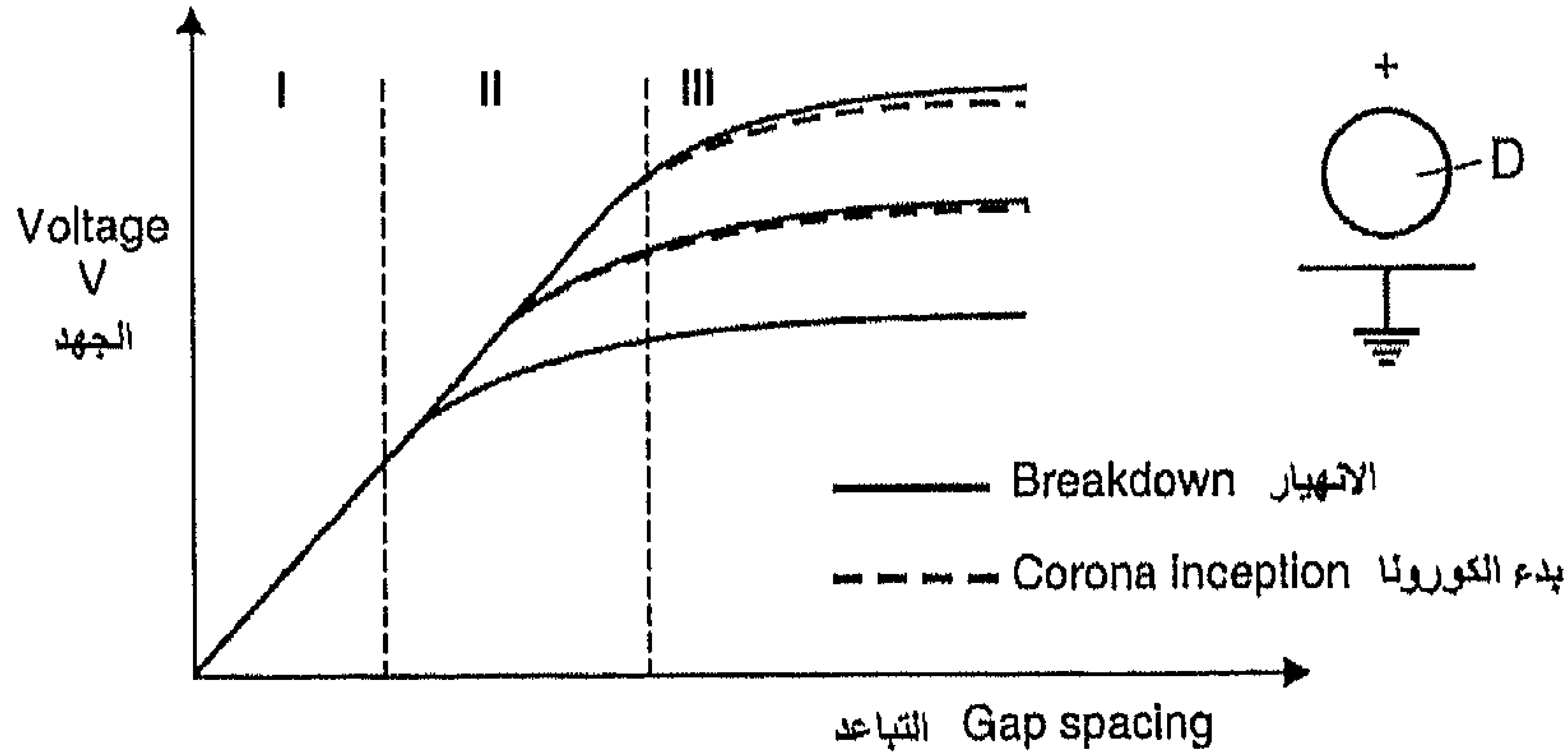
مع ثغرة مستوى–نقطة في الهواء وعندما يؤثر جهد سالب القطبية على النقطة ويتعدى الجهد قيمة البدء، فإن التيار يتدفق بنبضات منتظمة جداً تعرف باسم "نبضات تريشيل" Trichel pulses. جهد البدء يكون مستقلاً عن طول الثغرة ويساوي عددياً بدء المجرى تحت جهد موجب لنفس الترتيب. ويزداد تردد النبضة مع الجهد ويكون دالة في نصف قطر الكاثود، طول الثغرة والضغط. الانخفاض في الضغط يخفض تردد النبضات. ويجب ملاحظة أن جهد الانهيار مع قطبية سالبة يكون أعلى مما هو عليه مع قطبية موجبة فيما عدا عند ضغط منخفض. لذلك، فإنه تحت جهد متردد القدرة a.c فإن انهيار ثغرة مجال غير منتظم يحدث أثناء نصف الدورة الموجب لموجة الجهد.

الشكل 1.8 يوضح مقارنة بين خصائص انهيار ثغرة السطح–نقطة الموجب والسالب المقاسة في الهواء كدالة في ضغط الغاز.



الشكل 1.8: انهيار ثغرة المستوى–نقطة لقطبيات موجبة وسالبة كدالة في ضغط الغاز

عندما يكون التباعد صغيراً فإن خصائص الانهيار للقطبيتين ينطبقا تقريباً ولا تلاحظ كورونا مستقرة المنطقة. ومع زيادة التباعد، فإن الخصائص الموجبة تعرض انهيار الكورونا الواضحة العالية عند ضغط حوالي 7 bars، ثم تتبع بهبوط مفاجئ في متانة الانهيار. وتحت القطبية السالبة، تمتد منطقة الكورونا مستقرة المنطقة إلى ضغوط أكثر علواً.



الشكل 1.9: خصائص الانهيار وبدء الكورونا لكرات ذات أقطار مختلفة لنظام مستوى-كروي

الشكل 1.9 يوضح بداية الكورونا وجهود الانهيار لنظام مستوى-كرة. ومن الشكل، يتضح الآتي:

١. لتباعدات صغيرة [المنطقة I]، يكون المجال منتظم ويعتمد جهد الانهيار أساساً على تباعد الثغرة.

٢. في المنطقة II، حيث يكون التباعد أكبر نسبياً، يكون المجال الكهربي غير منتظم ويعتمد جهد الانهيار على كل من قطر الكرة والتباعد.

٣. ولمزيد من التباعد [المنطقة III]، يكون المجال غير منتظم ويسبق الانهيار كورونا، ويتم التحكم فيها بواسطة التباعد فقط. ويعتمد جهد بدء الكورونا أساساً على قطر الكرة.

١-١١ الانهيار في العوازل الكهربية السائلة Breakdown in Liquid Dielectric

تستخدم العوازل الكهربية السائلة لملء المحولات، قواطع الدائرة وكمُشرِّبات impregnants في كابلات الجهد العالي والمكثفات. بالنسبة للمحول، يستخدم العازل الكهربي السائل لكل من إعطاء عزل بين الأجزاء الحية للمحول والأجزاء المؤرضة إلى جانب حمل الحرارة إلى خارج

المحول إلى الهواء الجوي وبذلك يعطي تأثير مُبرد. وبالنسبة لقواطع الدائرة circuit breaker، فإلى جانب إعطاء العزل بين الأجزاء الحية والمؤرضة، يستخدم العازل السائل ليخمد القوس المتولد بين تلامسات القاطع. معظم العوازل الكهربية السائل المستخدمة تكون من الزيوت البترولية. والزيوت الأخرى المستخدمة تكون الهيدروكربونات المخلقة والهيدروكربونات المهلجنة ولتطبيقات درجة الحرارة العالية تستخدم أيضاً زيوت السيليكون والهيدروكربونات الفلورية.

أهم خواص العوازل الكهربية السائلة:

١. متانة العازل dielectric strength.
٢. ثابت العازل dielectric constant.
٣. التوصيلية الكهربية electrical conductivity.

والخواص الهامة الأخرى هي: اللزوجة، الاستقرار الحراري، الثقل النوعي، نقطة الوميض ...إلخ. أهم العوامل التي تؤثر على متانة الزيت هي وجود قطرات دقيقة من الماء وشوائب ليفية. وجود حتى 0.01% من الماء في الزيت يخفض متانة العازل إلى 20% من قيمة الزيت الجاف ووجود الشوائب الليفية يخفض متانة العازل بحدة كبيرة. لذلك، عندما تستخدم هذه الزيوت لإعطاء عزل كهربي، يجب أن تكون خالية من الرطوبة، نواتج التأكسد والملوثات الأخرى.

الاعتبار الرئيسي عند اختيار العازل الكهربي السائل هو استقراره الكيميائي. والاعتبارات الأخرى هي التكلفة، التوفير في الفراغ، المتأثرية للتأثيرات البيئية المحيطة، ...إلخ. استخدام العوازل الكهربية السائلة أدى إلى خفض هائل في حجم المعدات. وفي الحقيقة، فمن المستحيل عملياً إنشاء محول 765 kV مع الهواء كوسط عازل. الجدول 1.2 يبين خواص بعض العوازل الكهربية شائعة الاستخدام في المعدات الكهربية.

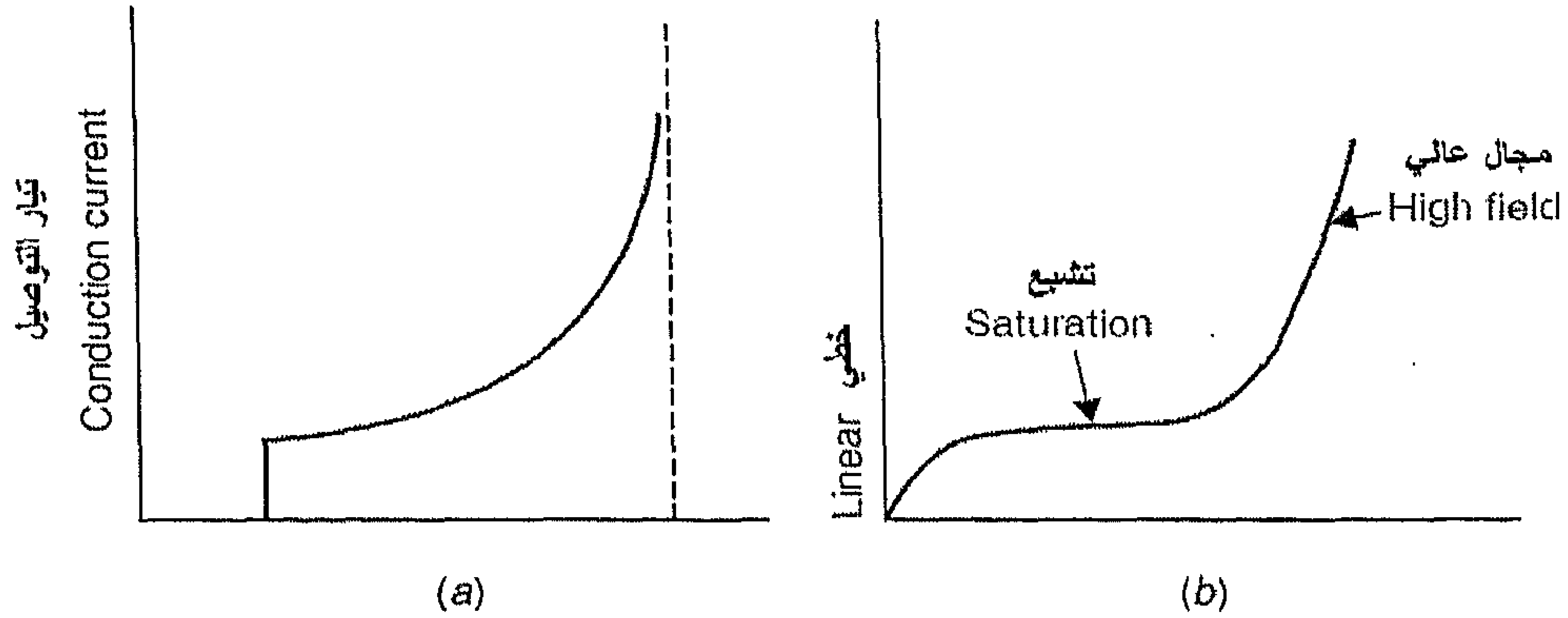
السوائل التي تكون نقية كيميائياً، بسيطة التكوين ولا تحتوي أي شوائب حتى بآثار $1 \text{ in } 10^9$، تعرف بـ"السوائل النقية". وعلى النقيض فإن السوائل التجارية المستخدمة كسوائل عازلة تكون غير نقية كيميائياً وتحتوي مخاليط من الجزيئات العضوية المركبة. وفي الحقيقة فإن سلوكهم يكون خاطئ، وأي عينتين من الزيت يؤخذا من نفس الحاوية لن يتصرفا بالمثل.

نظرية انهيار عزل السائل تكون أقل فَهْمًا اليوم مقارنة بالغازات أو حتى المواد الصلبة. وقد تم بحث كثير من جوانب انهيار السوائل عبر العقود السابقة، ورغم ذلك لم توضع حتى الآن نظرية عامة لشرح الانهيار في السوائل. والأبحاث التي نفذت -مع ذلك- يمكن أن تقسم إلى

مدرستين فكريتين: الأولى تحاول شرح الانهيار في السوائل على نموذج هو في الحقيقة امتداد للانهيار الغازي، وتؤسس على تأين الانهمار للذرات الناتج بتصادم الإلكترونات في المجال المؤثر. وتفترض أن الإلكترونات تنبعث من الكاثود إلى السائل إما بانبعاث مجال أو بواسطة الظاهرة الثرميونية المعززة بالمجال [ظاهرة شوتكي]. وآلية الانهيار تلك تشرح الانهيار الخاص بالسائل عالي النقاء ولا تطبق لشرح آلية الانهيار في السوائل المتاحة تجارياً. وقد لوحظ أن التوصيل في السوائل النقية عند مجال كهربي منخفض (1 kV/cm) تكون أكبر أيونية بسبب تحلل الشوائب وزيادة الخطية مع شدة المجال. عند المجالات العالية قليلاً يتشبع التوصيل ولكن عند المجال الكهربي العالي (100 kV/cm) يزداد التوصيل بسرعة أكبر وهكذا يحدث الانهيار. الشكل 1.10(a) يبين تغير التيار كدالة في المجال الكهربي للهكسان. وهو شرط قريب من الانهيار. ومع ذلك، إذا أعيد رسم الشكل مع مجالات منخفضة، تكون خصائص التيار–المجال الكهربي كما هي موضحة في الشكل 1.10(b) وهذا المنحنى له ثلاث مناطق محددة كما سبق.

الجدول 1.2: خواص العوازل الكهربية لبعض السوائل

م	الخاصية	زيت المحولات	زيت المكثفات	زيت الكابلات	زيت السيليكون
١.	المنفذية الكهربية النسبية 50 Hz	2.2–2.3	2.1	2.3–2.6	2.7–3.0
٢.	متانة الانهيار عند 20°C 1 min	12 kV/mm	18 kV/mm	25 kV/mm	35 kV/mm
٣.	(أ) $\tan\delta$ 50 Hz	10^{-3}	2.5×10^{-4}	2×10^{-3}	10^{-3}
	(ب) 1 kHz	5×10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
٤.	المقاومية resistivity ohm-cm	$10^{12}-10^{13}$	$10^{13}-10^{14}$	$10^{12}-10^{13}$	2.5×10^{14}
٥.	أقصى محتوى مياه مسموح به (ppm)	50	50	50	< 40
٦.	القيمة الحمضية mg/gm من KOH	NIL	NIL	NIL	NIL
٧.	التصبن mg من KOH/gm من الزيت	0.01	0.01	0.01	< 0.01
٨.	الثقل النوعي عند 20°C	0.89	0.89	0.93	1.0–1.1



الشكل 1.10 : تغير التيار كدالة في المجال الكهربي. (a) مجالات عالية؛ (b) مجالات منخفضة

المدرسة الفكرية الثانية لاحظت أن وجود جسيمات غريبة في العوازل السائلة لها تأثير ملحوظ على متانة عزل العازلات الكهربية السائلة. وقد اقترحت أن الجسيمات السائلة قابلة للاستقطاب وذات منفذية كهربية أعلى من السائل نفسه. وهذه الجسيمات تمارس قوة كهربية موجهة في اتجاه المكان ذو الإجهاد الأقصى. ومع إلكترودات مجال منتظم افترض أن حركة الجسيمات تبدأ من الأماكن غير المنتظمة [غير المستوية] من سطح الإلكترودات، التي ترفع تدرج المجال المحلي. وبذلك تتراكم الجسيمات وتميل إلى تشكيل قنطرة عبر الثغرة والتي تؤدي في النهاية لبدء الانهيار. ويمكن أن تكون الشوائب أيضاً على هيئة فقاعات غازية والتي من الواضح أن لها متانة عزل أقل من السائل نفسه وبالتالي فعند انهيار الفقاعات يمكن أن يبدأ الانهيار الكلي للسائل.

الانهيار الإلكتروني Electronic Breakdown

عند حقن إلكترون في السائل، يكتسب طاقة عن المجال الكهربي المؤثر بين الإلكترودات. يفترض أن بعض الإلكترونات ستكتسب مزيد من الطاقة بسبب المجال أكثر مما ستفقده أثناء التصادم. هذه الإلكترونات تُعجل تحت المجال الكهربي وستكتسب طاقة كافية لإخراج إلكترون وبذلك تبدأ عملية الانهمار. شرط البداية threshold condition بدء الانهمار يتحقق عندما تكون الطاقة المكتسبة بالإلكترون مساوية للطاقة المفقودة أثناء التأين [انبعاث الإلكترون] وتعطى كالآتي:

$$e\lambda E = C h\nu$$

حيث λ = متوسط المسار الحر.

$h\nu =$ طاقة التأين.

$C =$ ثابت.

الجدول 1.3 يعطي قيم نموذجية لمتانات العزل الكهربي لبعض السوائل عالية النقاء.

الجدول **1.3**: متانة العزل الكهربية لسوائل نقية

السائل النقي	متانة العزل الكهربي (MV/cm)
البنزين	1.1
جودأويل	1.0–4.0
هكسان	1.1–1.3
نيتروجين	1.6–1.88
أكسجين	2.4
سيليكون	1.0–1.2

في النظرية الإلكترونية حيث تتنبأ بالقيم النسبية لمتانة العزل الكهربي بشكل مرضٍ، إلا أن أزمنة التأخير المتكونة التي تم ملاحظتها تكون أكثر طولاً مقارنة مع تلك المستخرجة بواسطة النظرية الإلكترونية.

١-١١-١ آلية الجسيم الصلب المعلق Suspended Solid Particle Mechanism

ستحتوي السوائل التجارية دائماً على شوائب صلبة إما كألياف أو كجسيمات صلبة مبعثرة [مشتتة]. منفذية هذه المواد الصلبة E_1 ستكون دائماً مختلفة عن تلك الخاصة بالسائل E_2. والآن دعنا نفترض أن هذه الجسيمات تكون كرات ذات نصف قطر r. هذه الجسيمات تستقطب في مجال كهربي E وتجني قوة تعطى بالآتي:

$$F = r^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} E \cdot \frac{dE}{dx}$$

وهذه القوة تكون موجهة في اتجاه مكان ذات إجهاد أعلى إذا كان $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ وفي اتجاه مكان ذو جهد أقل إذا كان $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ عندما يكون ε_1 هي منفذية فقاعات الغاز. القوة المعطاة بأعلى تزداد كلما زادت منفذية الجسيمات المعلقة ε_1. وإذا $\varepsilon_1 \to \infty$ فإن:

$$F = r^3 \frac{1 - \varepsilon_2/\varepsilon_1}{1 - 2\varepsilon_2/\varepsilon_1} E \frac{dE}{dx}$$

في حالة $\varepsilon_1 \to \infty$ فإن:

$$F = r^3 E \cdot \frac{dE}{dx}$$

وهكذا ستوجه القوة الجسيم ليتحرك في اتجاه المنطقة الأقوى من المجال. في مجال كهربي منتظم والذي يمكن عادة أن ينشأ بواسطة ثغرة كرة صغيرة، يكون المجال الأقوى في منطقة المجال المنتظم. هنا $dE/dx \to 0$ لذلك تكون القوة على الجسيم صفراً ويبقى الجسيم في توازن. لذلك، فإن الجسيمات ستنسحب إلى منطقة المجال المنتظم. وحيث إن منفذية الجسيمات تكون أعلى من تلك الخاصة بالسائل، فإن تواجد الجسيم في منطقة المجال المنتظم ستسبب تركيز فيض flux concentration عند سطحه. الجسيمات الأخرى إذا تواجدت ستنجذب في اتجاه تركيز الفيض الأعلى. إذا كانت الجسيمات المتواجدة كبيرة، فإنها تصبح مصطفة بسبب هذه القوى وتشكل قنطرة عبر الثغرة. وسيزداد المجال في السائل بين الثغرة، وإذا وصل إلى قيمة حرجة، سيحدث الانهيار. إذا كان عدد الجسيمات غير كاف لقنطرة الثغرة، فإن الجسيمات سترفع من تعزيز المجال المحلي وإذا تعدى المجال متانة عزل السائل، سيحدث انهيار محلي بالقرب من الجسيمات وبذلك سيؤدي إلى تكون فقاعات غازية لها متانة عزل أقل كثيراً وتؤدي في النهاية إلى انهيار السائل.

١-١١-٢ انهيار الفجوة Cavity Breakdown

لوحظ معملياً أن متانة العزل الكهربي تعتمد على الضغط الهيدروستاتيكي فوق طول الثغرة. فكلما زاد الضغط الهيدروستاتيكي، ارتفعت المتانة الكهربية، والتي تقترح أن أي تغير في طور السائل يكون مشمولاً في عملية الانهيار. في الحقيقة، كلما صغر علو head السائل، زادت فرص الغازات المتأينة جزئياً الآتية من الثغرة وازدادت فرص الانهيار. وهذا يعني أن نوع من الفقاعات البخارية المتكونة يكون مسئولاً عن الانهيار. ويمكن أن تؤدي العمليات التالية إلى تكون الفقاعات في السوائل:

١. الجيوب الغازية على سطح الإلكترودات.

٢. بسبب سطح الإلكترودات غير المنتظم، يمكن أن يؤدي تركيز نقط الشحنة إلى تفريغ كورونا، وبذلك يبخر السائل.

٣. التغيرات في درجة الحرارة والضغط.

٤. تفكك [تحلل] النواتج بواسطة اصطدامات الإلكترون مما يرفع من النواتج الغازية.

وقد اُقترح أن المجال الكهربي في فقاعة غازية مغمورة في سائل ذو منفذية ε_2 يعطى كالآتي:

$$E_b = \frac{3E_0}{\varepsilon_2 + 2}$$

حيث $E_0 =$ المجال في السائل في غياب الفقاعة.

وتستطيل الفقاعة التي تحت تأثير المجال الكهربي E_0 مع الحفاظ على حجمها ثابت. وعندما يساوي المجال E_b مجال التأين الغازي، يحدث تفريغ سيؤدي إلى تحلل السائل ويمكن أن يتبع ذلك الانهيار.

انهيار الحَمْل الكهربي Electroconvection Breakdown

لوحظ أن الحَمْل الكهربي يلعب دوراً هاماً في انهيار الموائع العازلة التي تتعرض لجهود عالية. فعندما يتعرض سائل عازل عالي النقاء إلى جهد عالي، ينتج حَمْل كهربي من حاملات الشحنة المحقونة في السائل من سطح الإلكترود. وتعطي شحنة الفراغ الناتجة ارتفاعاً للقوة الكولومبية التي تسبب عدم استقرار هيدروديناميكي تحت شروط معينة، مما يثمر عن تيار حَمْل. وقد تبين أن عدم الاستقرار المحدد يكون مرتبطاً بجهد حرج. وبمجرد اقتراب الجهد المؤثر من الجهد الحرج، فإن الحركة عند الأول تُظهر بنيان من خلايا سداسية ومع زيادة الجهد أكثر تصبح الحركة دوامية. وهكذا يعطي التفاعل بين شحنة الفراغ والمجال الكهربي ارتفاعاً للقوى التي تخلق حركة دوامية للسائل.

وقد تبين أنه عندما يكون الجهد المؤثر قريباً من قيمة الانهيار، فإن سرعة الحركة الدوامية تعطى كالآتي:

$$v_e = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\rho}}$$

حيث $\rho =$ كثافة السائل.

وفي السوائل ذات الانسياق الأيوني تعطى السرعة بالآتي:

$$v_d = K E$$

حيث $K =$ حركية الأيونات mobility of ions.

والآن نفترض أن:

$$M = \frac{v_e}{v_d} = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\rho}}}{K\,E}$$

النسبة M تكون عادة أكبر من الوحدة وأحياناً أكبر كثيراً من الوحدة [الجدول 1.4].

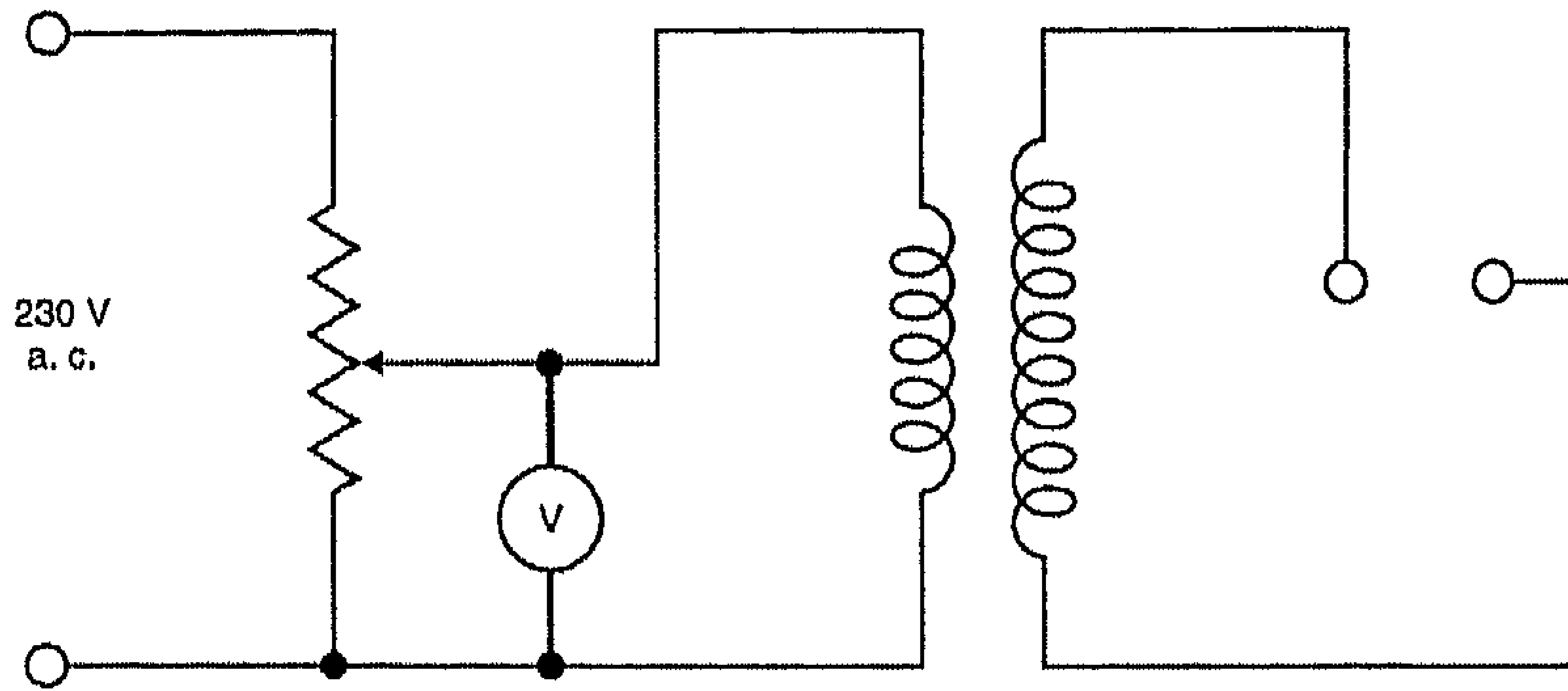
الجدول 1.4

الوسط	الأيون	ε	M
هواء NTP	O_2^-	1.0	2.3×10^{-2}
الإيثانول	Cl^-	2.5	26.5
الميثانول	H^+	33.5	4.1
النتروبنزين	Cl^-	35.5	22
كربونات البروبيلين	Cl^-	69	51
زيت محولات	H^+	2.3	200

وهكذا، في نظرية الحَمْل الكهربي، تلعب M دوراً هاماً. انتقال الشحنة سيكون أكبر بواسطة حركة السائل وليس بالانسياق الأيوني. معيار عدم الاستقرار هو أن سرعة التدفق المحلي يجب أن تكون أكبر من سرعة الانسياق drift.

١-١٢ اختبار زيت المحول Testing of Transformer Oil

يسكب الزيت في حاوية تعرف باسم "خلية الاختبار" لها أبعاد داخلية 90 mm × 55 mm × 100 mm ارتفاع. والإلكترودات تكون كرات لامعة ذات قطر 12.7–13 mm، ويفضل أن تكون من النحاس الأصفر، مرتبة أفقياً مع محاورها فوق قاع الخلية بما لا يقل عن 40 mm . وللاختبار، يجب أن تكون المسافة بين الكرات 0.02 mm + 4 ويستخدم مقياس لضبط الثغرة. وأثناء إعداد عينة الزيت، يجب أن تنظف خلية الاختبار ويتم إزالة الرطوبة والجسيمات المعلقة وتجنبها. الشكل 1.11 يبين نظام تجريبي لإيجاد متانة العزل الكهربي للعينة المعطاة من الزيت. الفولتميتر يكون موصلاً بالجانب الابتدائي لمحول الجهد العالي ولكنه معاير على جانب الجهد العالي.



الشكل 1.11: خلية اختبار زيت المحول

وتضبط الثغرة بين الكرات عند 4 mm بمساعدة مقياس وتغمر الكرات في الزيت إلى العمق السابق ذكره. ويزداد الجهد تدريجياً وباستمرار حتى نرى قفزة وميض الثغرة. يدون هذا الجهد، وهو ما يُعرف باسم "الجهد المؤثر سريعاً". ويحدث انهيار الثغرة أساساً بسبب تأثير المجال. ويكون التأثير الحراري أدنى حيث زمن التأثير يكون قصيراً.

وبعد ذلك ارجع الجهد إلى الصفر وابدأ بـ 40% من الجهد المؤثر سريعاً وانتظر لمدة دقيقة واحدة. وانظر ما إذا كانت الثغرة قد كُسرت أم لا؟ فإذا لم تكسر يتم زيادة الجهد كل مرة بـ %(2–2.1) من الجهد المؤثر سريعاً وانتظر لمدة دقيقة واحدة حتى تُرى قفزة الوميض أو تعتق الـ MCB. ثم دون هذا الجهد.

مرة ثانية ابدأ بجهد صفر وزد الجهد إلى القيمة المتحصل عليها في الخطوة السابقة وانتظر لدقيقة. ويتوقع حدوث الانهيار. وستعطي محاولات قليلة حول هذه النقطة قيمة انهيار متانة العازل. وتكون القيمة المقبولة هي 30 kV لثغرة طولها 4 mm تؤثر لمدة دقيقة واحدة. واليوم متاح زيوت محولات مع قيمة 65 kV لـ 4 mm، 1 min . إذا كانت أقل من 30 kV يجب أن يُرسل الزيت للتجديد. ويجب ملاحظة أنه إذا كانت الإلكترودات مغمورة رأسياً في الزيت، فإن متانة العزل المقاسة يمكن أن تكون أقل مما حصلنا عليه عند وضع الإلكترودات أفقياً وهو العادي. ويرجع ذلك إلى حقيقة أنه عندما يتحلل الزيت ترتفع جسيمات الكربون الخفيفة وإذا كانت الإلكترودات رأسية، فإنها سوف تقنطر الثغرة وسيحدث الانهيار عند قيمة أقل نسبياً.

١-١٣ الانهيار في العوازل الصلْبة Breakdown in Solid Dielectrics

تستخدم المواد العازلة الصلبة في كل المعدات الكهربية، سواء في المسخن الكهربي أو المولد 500 MW أو القاطع الكهربي، والعزل الصلب يشكل جزء مكمل لجميع المعدات الكهربية

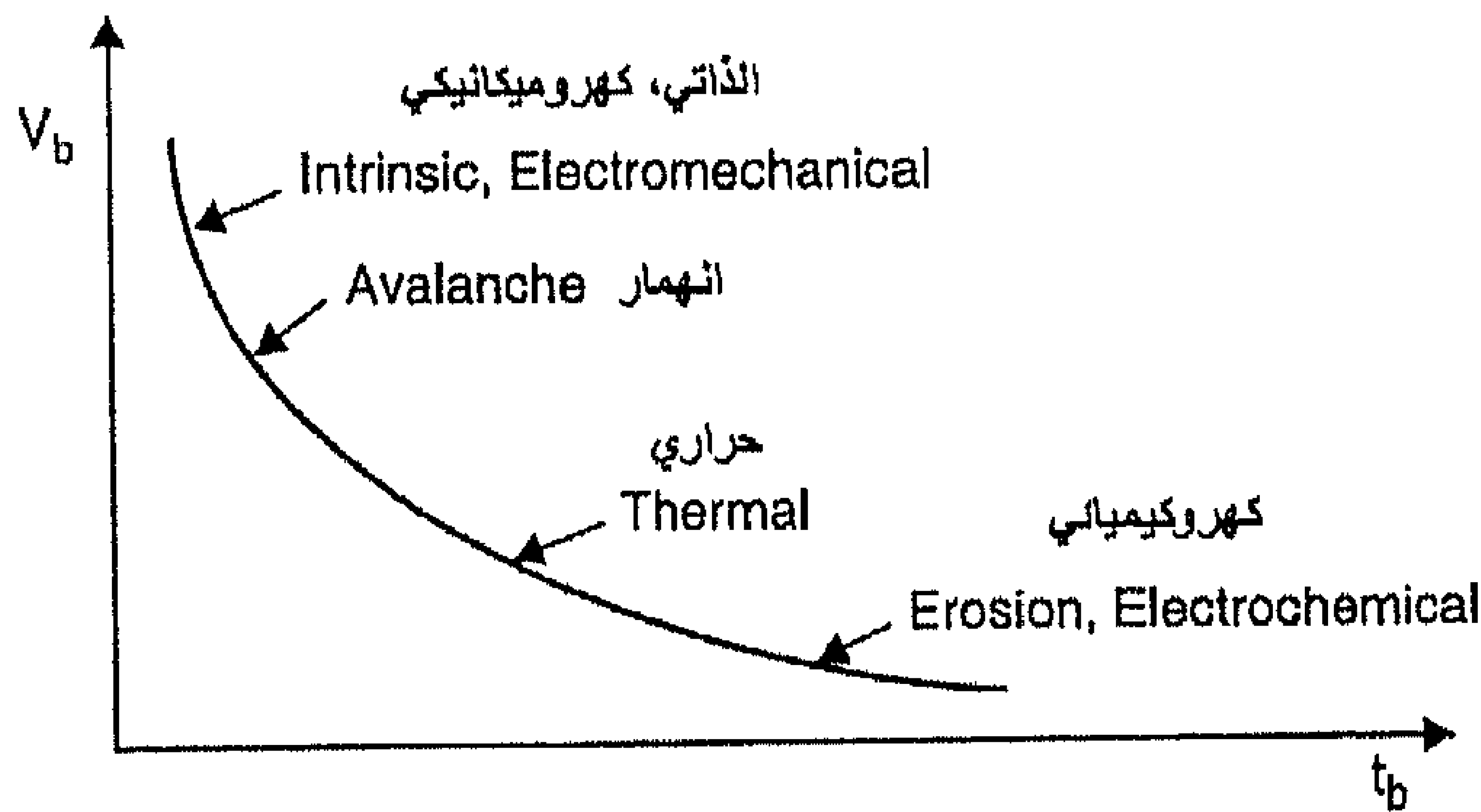
وخصوصاً عندما يكون جهد التشغيل عالياً. والعزل الصلب لا يمنح فقط عزل للأجزاء الحية للمعدة من الأجزاء المؤرضة، بل إنه أحياناً يعطي تدعيم ميكانيكي للمعدة. وعامة –طبعاً– فإنه تستخدم توليفة مناسبة من العوازل الصلبة، السائلة والغازية.

العمليات المسئولة عن انهيار العوازل الغازية تحكم بواسطة النمو السريع للتيار بسبب انبعاث الإلكترونات من الكاثود، تأين جسيمات الغاز والنمو السريع لعملية الانهمار. عند حدوث الانهيار تستعيد الغازات متانة عزلها سريعاً جداً، وتستعيد السوائل جزئياً وتفقد العوازل الصلبة متانتها تماماً.

ولا يعتمد انهيار العوازل الصلبة فقط على مقدار الجهد المؤثر ولكنه أيضاً دالة في زمن تأثير الجهد. وبالتقريب، فإن حاصل ضرب جهد الانهيار والزمن الطويل المطلوب للانهيار يكون غالباً ثابت، أي أن:

$$V_b \ln t_b = \text{constant}$$

ويوضح الشكل 1.12 هذه الخاصية.



الشكل 1.12: تغير V_b مع زمن التأثير t_b

وتتأثر متانة العزل الكهربي للمواد الصلبة بعدة عوامل: درجة الحرارة المحيطة، الرطوبة، فترة دوام الاختبار، الشوائب أو العيوب التركيبية سواء استخدمت الجهود a.c أو d.c أو النبضية [الدفعية]، الضغط المؤثر على هذه الإلكترودات، ...إلخ. آلية الانهيار في المواد الصلبة مازال أقل فهماً. ومع ذلك، كما سبق القول يلعب زمن التأثير دوراً هاماً في عملية الانهيار، ولأغراض المناقشة، فمن الملائم تقسيم المدى الزمني لتأثير الجهد إلى مناطق تعمل بها آليات مختلفة. الآليات المختلفة هي:

١. الانهيار الذاتي.
٢. الانهيار الكهروميكانيكي.
٣. الانهيار بسبب التشجر والتتبع.
٤. الانهيار الحراري.
٥. الانهيار الكهروكيميائي.

١-١٣-١ الانهيار الذاتي [الحقيقي] Intrinsic Breakdown

إذا كانت المادة العازلة نقية ومتجانسة، فإن درجة الحرارة والشروط البيئية يتحكم فيها بشكل مناسب وإذا أثر الجهد لزمن قصير جداً في حدود 10^{-8} sec. ، فإن متانة العزل الكهربي للعينة يزداد بسرعة إلى نهاية عليا تعرف باسم "متانة العزل الذاتية". المتانة الذاتية، لذلك، تعتمد أساساً على التصميم الإنشائي للمادة أي المادة نفسها وتتأثر بدرجة الحرارة المحيطة كما أن التركيب نفسه يمكن أن يتغير قليلاً بشرط الحرارة. ولكي نحصل على متانة العزل الكهربي الذاتي لمادة يتم إعداد العينات بحيث يكون هناك إجهاد عالي في مركز العينة وإجهاد أكثر انخفاضاً عند الأركان كما هو مبين في الشكل 1.13.



الشكل 1.13: عينة مصممة للانهيار الذاتي

ويتم الحصول على الانهيار الذاتي في أزمنة في حدود 10^{-8} sec. –ولذلك– تعتبر إلكترونية في الطبيعة. الإجهادات المطلوبة تكون في حدود 10^{6} Volt/cm . ويفترض الوصول إلى المتانة الذاتية عامة عندما تكتسب الإلكترونات في نطاق التكافؤ طاقة كافية من المجال الكهربي لكي تعبر نطاق الطاقة المحظورة إلى نطاق التوصيل. في المواد النقية والمتجانسة تكون نطاقات التكافؤ والتوصيل منفصلة بواسطة ثغرة طاقة كبيرة عند درجة حرارة الغرفة، ولا يستطيع أي إلكترون أن يقفز في نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل. لذلك، فإن موصلية العوازل الكهربية النقية عند درجة حرارة الغرفة تكون صفر. ومع ذلك، عمليا، لا تكون أي مادة عازلة نقية –ولذلك– يكون لديها بعض الشوائب و/أو عيوب في تصميمها التركيبي. ويمكن أن تعمل ذرات الشوائب كمصائد للإلكترونات الحرة في مستويات الطاقة التي تقع تحت نطاق التوصيل مباشرة. ولذلك،

سيكون للبلورة غير المتبلورة amorphous crystal دائماً بعض الإلكترونات الحرة في نطاق التوصيل. عند درجة حرارة الغرفة ستثار بعض الإلكترونات التي تم اصطيادها حرارياً إلى نطاق التوصيل حيث ثغرة الطاقة بين نطاق الاصطياد ونطاق التوصيل تكون صغيرة. ولذلك فإن البلورة غير المتبلورة يكون لديها بعض الإلكترونات الحرة في نطاق التوصيل. وعند التأثير بمجال كهربي، تكتسب الإلكترونات طاقة وبسبب التصادمات بينهم يتم اقتسام الطاقة بواسطة كل الإلكترونات. في أي عازل كهربي غير متبلور تكون الطاقة المكتسبة بالإلكترونات من المجال الكهربي أكثر كثيراً مما يمكن أن تنقله إلى الشبيكة lattice. لذلك، فإن درجة حرارة الإلكترونات سوف تتعدى درجة حرارة الشبيكة وهذا سيؤدي إلى زيادة عدد الإلكترونات التي يتم اصطيادها الواصلة إلى نطاق التوصيل وتؤدي في النهاية لإكمال الانهيار.

عندما يتعرض إلكترود مدفون في عينة صلبة لمجال كهربي منتظم، يمكن أن يحدث انهيار. أي إلكترون يدخل نطاق التوصيل لعازل كهربي عند الكاثود سيتحرك في اتجاه الآنود تحت تأثير المجال الكهربي. وأثناء حركته يكتسب طاقة عند التصادم يفقد جزء من الطاقة. إذا كان متوسط المسار الحر طويلاً، فإن الطاقة المكتسبة بسبب الحركة تكون أكبر من المفقودة أثناء التصادم. وتستمر العملية ويمكن أن تؤدي في النهاية إلى تكون انهمار إلكتروني مماثل للغازات يؤدي في النهاية إلى انهيار إذا تعدى الانهمار حجم حرج معين.

١-١٣-٢ الانهيار الكهروميكانيكي Electromechanical Breakdown

عندما تتعرض مادة عازلة كهربياً لمجال كهربي، تستحث شحنات ذات طبيعة متعاكسة على السطحين المتقابلين للمادة وبالتالي تنشأ قوة جذب وتتعرض العينة لقوى ضاغطة كهروستاتيكية وعندما تتعدى هذه القوى متانة المقاومة الميكانيكية للمادة، تنهار المادة وتتداعى. فإذا كان السمك الابتدائي للمادة هو d_0 وانضغط إلى سمك d تحت الجهد المؤثر V فإن الإجهاد الضاغط الناشئ بسبب المجال الكهربي يكون:

$$F = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{d^2}$$

حيث ε_r = المنفذية النسبية للعينة.

وإذا كانت Y هي معامل يونج، فإن متانة الانضغاط الميكانيكي تكون:

$$Y \ln\frac{d_0}{d}$$

وبمساواة شرطي الاتزان، نحصل على:

$$\frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{V^2}{d^2}=Y\ln\frac{d_0}{d}$$

أو
$$V^2=d^2\cdot\frac{2Y}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\ln\frac{d_0}{d}=K\,d^2\ln\frac{d_0}{d}$$

وبالتفاضل بالنسبة لـ d، نحصل على:

$$2V\frac{dV}{dd}=K\left(2d\ln\frac{d_0}{d}-d^2\cdot\frac{d}{d_0}\cdot\frac{d_0}{d^2}\right)=0$$

أو
$$2d\ln\frac{d_0}{d}=d$$

أو
$$\ln\frac{d_0}{d}=\frac{1}{2}$$

أو
$$\frac{d}{d_0}=0.6$$

لأي قيمة حقيقية للجهد V، يكون الانخفاض في سمك العينة لا يزيد عن 40% . إذا كانت النسبة V/d عند هذه القيمة لـ V أقل من المتانة الذاتية intrinsic strength للعينة، فإنه مع مزيد من الزيادة في V ستجعل السمك غير مستقر وتنهار العينة. وعندئذ نحصل على أعلى متانة ظاهرة بالتعويض عن $d=0.6d_0$ في المعادلات السابقة:

$$\frac{V}{d}=\sqrt{\frac{2Y}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\ln 1.67}$$

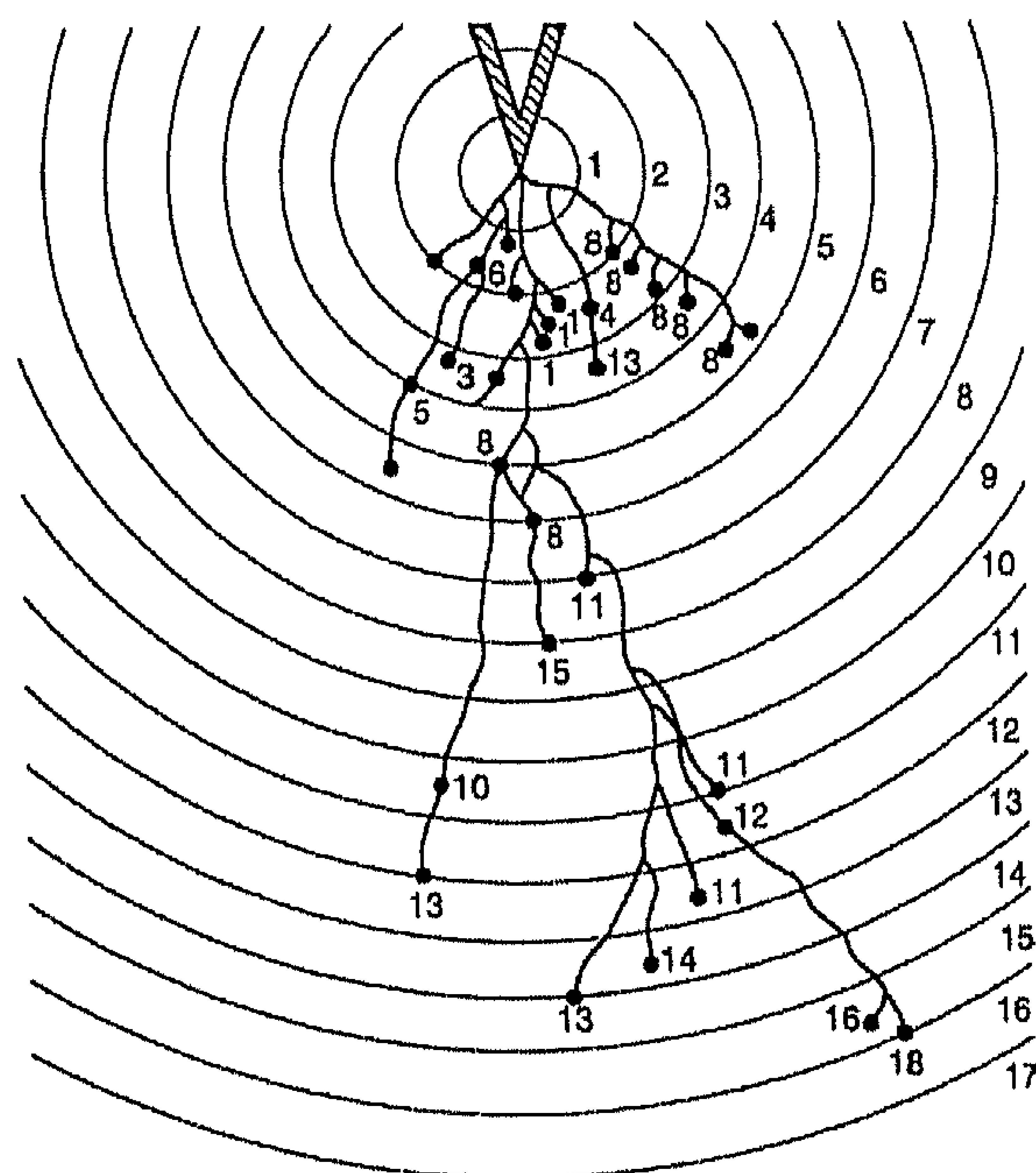
أو
$$\frac{V}{d_0}=E_a=0.6\left(\frac{Y}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)^{1/2}$$

المعادلة السابقة تقريبية فقط، حيث Y تعتمد على الإجهاد الميكانيكي. تُهمل إمكانية عدم الاستقرار التي تحدث لمجال متوسط أقل، أي أن تأثير تركيز الإجهاد عند عدم الانتظام لا يؤخذ في الاعتبار.

١-١٣-٣ الانهيار بسبب التشجر والتتبع Breakdown Due to Treeing & Tracking

نحن نعرف أن متانة أي سلسلة تعطى بمتانة أضعف وصلة في السلسلة. وبالمثل، عند تكون مادة صلبة بها بعض الشوائب المكونة من بعض الجيوب الغازية أو السائلة فيها فإن متانة

العزل الكهربي للمادة الصلبة ستكون أكبر أو أقل من متانة الشوائب الأضعف. نفترض بعض الجيوب الغازية تم اصطيادها في مادة صلبة أثناء التصنيع. الغاز له منفذية نسبية قريبة من الوحدة والمادة الصلبة لها ε_r. وسيكون المجال الكهربي في الغاز ε_r ضعف المجال في المادة الصلبة. ونتيجة لذلك فإن الغاز ينهار عند جهد أقل نسبياً. تركيز الشحنة هنا في الخلوة [الفراغ] سيجعل المجال غير منتظم أكثر. تركيز الشحنة في تلك الخلوات وجد أنه كبير بدرجة تعطي مجالات في حدود 10 MV/cm وهي أعلى من الانهيار الذاتي. تركيزات الشحنة هذه عند الخلوات داخل العازل الكهربي تؤدي إلى انهيار خطوة بخطوة وتؤدي في النهاية إلى تصدع وتمزق كامل للعازل الكهربي. وحيث إن الانهيار لا يحدث بواسطة تفريغ قناة مفردة بل يشكل تكوين مثل الشجرة كما هو مبين في الشكل 1.14، فإنه يُعرف بـ"الانهيار الشجري" [مثل الشجرة]. ظاهرة التشجر يمكن أن توضح في معمل بتأثير جهد دفعي impulse voltage بين إلكترودات مستوى–نقطة مع دفن النقطة في عازل كهربي صلب شفاف مثل البيرسبكس perspex.



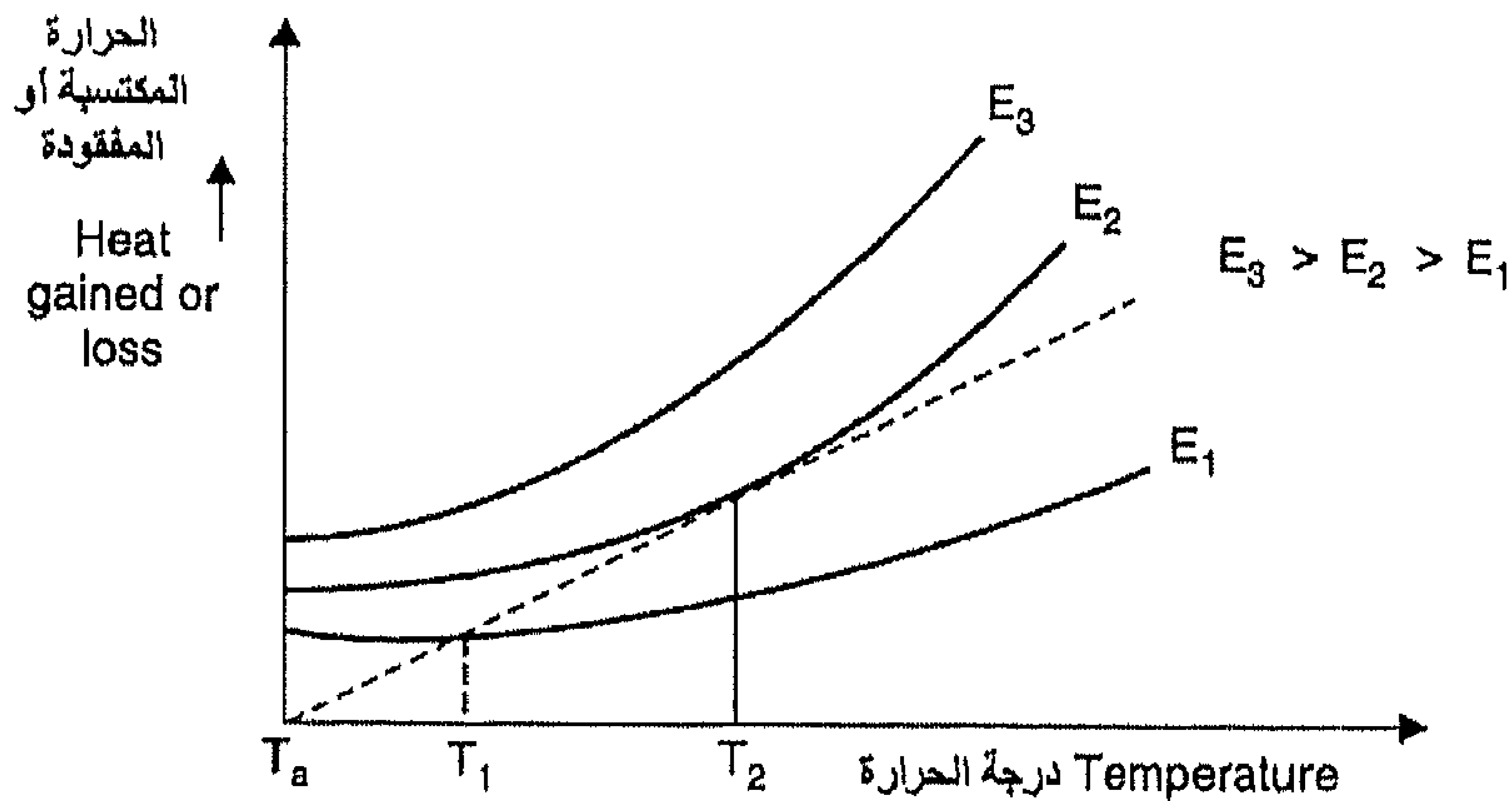
الشكل 1.14: انهيار التشجر

ويمكن ملاحظة ظاهرة التشجر في كل العوازل الكهربية حيث تسود مجالات غير منتظمة.

نفترض أن لدينا إلكترودان منفصلان بواسطة مادة عازلة ووضعت المجموعة في ظروف بيئية خارجية. ستترسب بعض الملوثات على هيئة رطوبة أو جسيمات رماد على سطح العزل ويبدأ تيار تسرب بين الإلكترودات من خلال الملوثات ولتكن الرطوبة. ويسخن التيار الرطوبة ويسبب كسور في طبقات الرطوبة. هذه الطبقات films الصغيرة بعد ذلك تعمل كإلكترودات وتتولد شرارة بين الطبقات. وتسبب الشرارة تكربن وتصعيد للعزل وتؤدي إلى تكون آثار كربونية متتابعة دائمة على سطح العازل. لذلك، فإن التتابع هو تكون مسارات موصلة دائمة تكون عادة كربونية عبر سطح العزل. ولكي يحدث التتبع، يجب أن تحتوي المادة العازلة على مواد عضوية. ولهذا السبب –بالنسبة للمعدات الخارجية– فإن التتبع يُحد بشدة من استخدام العزل الذي يحتوي على مواد عضوية. ويمكن إبطاء معدل التتبع بإضافة مرشحات إلى البوليمرات التي تمنع التكربن.

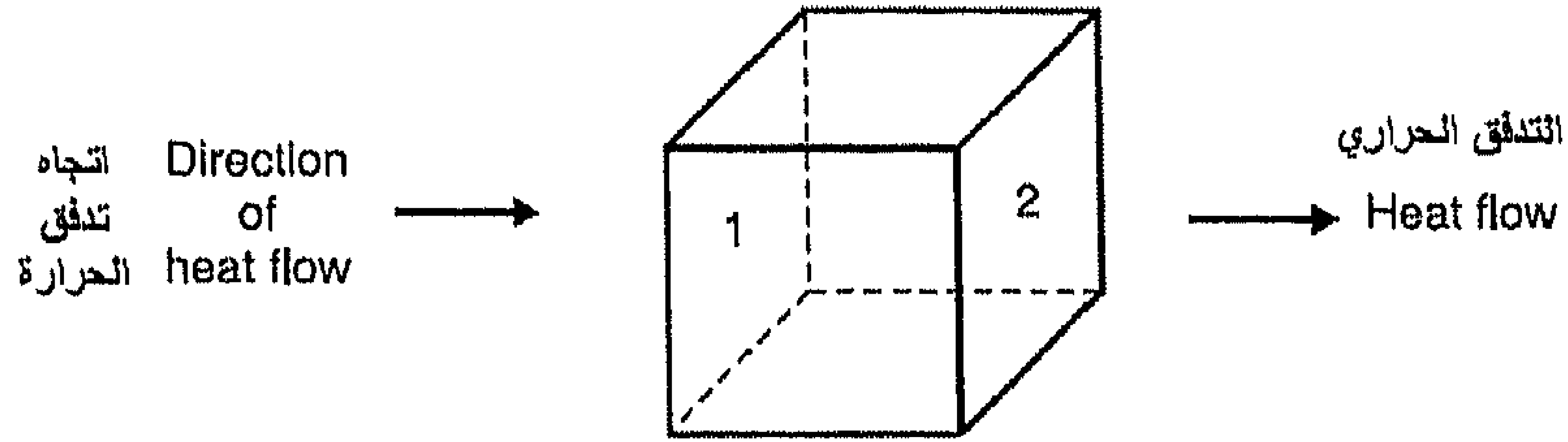
١-١٣-٤ الانهيار الحراري Thermal Breakdown

عندما تتعرض مادة عازلة لأي مجال كهربي فإن المادة تسخن بسبب تيار التوصيل ومفقودات العزل الكهربي بسبب الاستقطاب. وتزداد موصلية المادة مع زيادة الحرارة وتصل إلى شرط عدم الاستقرار عندما تكون الحرارة المتولدة أكبر من الحرارة المبددة بواسطة المادة ثم تنهار المادة. الشكل 1.15 يوضح منحنيات تسخين مختلفة تقابل إجهادات كهربية مختلفة كدالة في درجة حرارة العينة. وبفرض أن فرق درجة الحرارة بين درجة الحرارة المحيطة والعينة يكون صغيراً، فإن قانون نيوتن للتبريد يمثل بخط مستقيم.



الشكل 1.15 : الاستقرار أو عدم الاستقرار الحراري عند مجالات مختلفة

وتكون عينة الاختبار عند توازن حراري يقابل المجال E_1 عند درجة حرارة T_1 حيث بعد ذلك تكون الحرارة المتولدة أقل من الحرارة المفقودة. ويتواجد توازن غير مستقر للمجال E_2 عند T_2 وللمجال E_3 لا نصل إلى حالة التوازن أبداً ومن هنا تنهار العينة حرارياً.



الشكل 1.16: مكعب العينة–التدفق الحراري

ولكي نحصل على معادلة أساسية لدراسة الانهيار الحراري، دعنا نعتبر مكعب صغير [الشكل 1.16] من العينة العازلة كهربياً مع جانب Δx وفرق درجة حرارة عبر وجهيه في اتجاه تدفق الحرارة [يفترض هنا أن التدفق يكون بطول المحور– x] هو ΔT. لذلك، يكون ميل درجة الحرارة هو:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}=\frac{dT}{dx}$$

نفترض أن $\Delta x^2=A$ تدفق الحرارة عبر الوجه 1 يكون:

$$K\,A\frac{dT}{dx}\ \text{Joules}$$

تدفق الحرارة عبر الوجه 2 يكون:

$$K\,A\frac{dT}{dx}-K\,A\frac{d}{dx}\left(\frac{dT}{dx}\right)\Delta x$$

وهنا يشير الحد الثاني إلى دخل الحرارة إلى عينة تفاضلية. لذلك، فإن الحرارة الممتصة بواسطة حجم المكعب التفاضلي:

$$=\frac{K\,A\frac{d}{dx}\left(\frac{dT}{dx}\right)\Delta x}{\Delta v}=K\frac{d}{dx}\left(\frac{dT}{dx}\right)$$

دخل الحرارة إلى الكتلة سيتبدد جزئياً إلى البيئة المحيطة وجزئياً سيرفع من درجة حرارة الكتلة. نفترض أن C_v هي السعة الحرارية للعازل، σ هي الموصلية الكهربية، E هي شدة

المجال الكهربي. الحرارة المتولدة بواسطة المجال الكهربي = σE^2 وات، ونفترض أن درجة حرارة الكتلة ترتفع بمقدار ΔT، في زمن dt، القدرة المطلوبة لرفع درجة حرارة الكتلة بـ ΔT تكون:

$$C_v \frac{dT}{dt} \text{ Watts}$$

لذلك:

$$C_v \frac{dT}{dt} + K \frac{d}{dx}\left(\frac{dT}{dx}\right) = \sigma E^2$$

حل المعادلة السابقة سيعطينا الزمن المطلوب للوصول إلى درجة الحرارة الحرجة T_c التي عندها سنصل إلى عدم الاستقرار الحراري وسيفقد العازل الكهربي خواصه العازلة. مع ذلك، ولسوء الحظ فإن المعادلة يمكن أن تحل في صورتها الحالية حيث C_v، K، σ كلهم دوال في درجة الحرارة وفي الحقيقة فإن σ يمكن أيضاً أن تعتمد على شدة المجال الكهربي.

١-١٣-٥ الانهيار الكهروكيميائي Electrochemical Breakdown

عند تكوّن فجوات في العوازل الكهربية الصلبة، فإن متانة العزل في هذه العينات الصلبة تنخفض. وعندما ينهار الغاز في الفجوة، تعطي أسطح العينة آنود وكاثود لحظي. بعض الإلكترونات التي ترتطم بالآنود بطاقة كافية ستكسر الروابد الكيميائية لسطح العزل. بالمثل فإن الأيونات الموجبة التي تصطدم بالكاثود يمكن أن تزيد من درجة حرارة السطح وتنتج عدم استقرار حراري محلي. بالمثل، يمكن حدوث التدهور الكيميائي أيضاً من نواتج التفريغ الفعال مثل O_3، NO_2، ...إلخ، المتكونة في الهواء. والتأثير الصافي لكل هذه العمليات يكون تحات erosion بطيء في المادة وانخفاض متتالي في سمك العينة. وعادة يكون مطلوب مع التقدم في العمر ألا تنخفض متانة العزل للعينة. ومع ذلك، وبسبب العيوب في عمليات الصناعة و/أو التصميم، تنخفض متانة العزل مع زمن تأثير الجهد أو حتى بدون تأثير الجهد وفي كثير من الحالات، فإن الانخفاض في متانة العزل E_b مع الزمن تتبع العلاقة التجريبية التالية:

$$t\, E_b^n = \text{constant}$$

حيث الأس n يعتمد على المادلة العازلة، ودرجة الحرارة، وجودة التصنيع. وهذا هو السبب الرئيسي لعدم التوصية باستخدام جهد a.c عالي في الاختبارات. وفي الحقيقة، تم استخدام اختبار منخفض التردد جداً (0.1 Hz) والذي يحاكي تأثيرات كل من a.c 50 Hz والجهود d.c ولا تتأثر متانة العزل الكهربي للعينة كثيراً مع تطبيق جهد VLF.

أسئلة

١–١ ناقش العوامل المختلفة التي تؤثر على انهيار الغازات.

١–٢ عرف عوامل تأين تاونسند الأول والثاني. اشرح معيار تاونسند للشرارة.

١–٣ اذكر واشرح قانون باسيشين. وكيف تحسب أدنى جهد للانهيار تحت شروط pd المعطاة.

١–٤ اشرح آلية نمو المجرى للآنود والكاثود.

١–٥ اشرح باختصار النظريات المختلفة للانهيار في العوازل السائلة.

١–٦ اشرح آلية الجسيم المعلق لانهيار السائل.

١–٧ اذكر العمليات المختلفة التي تؤدي إلى تكون الفقاعات في العوازل السائلة.

١–٨ ما التوصيل الكهربي؟ اشرح انهيار السائل المبني على التوصيل الكهربي.

١–٩ اشرح ظاهرة بيننج بالرجوع إلى التفريغات الغازية.

١–١٠ ما تفريغ الكورونا؟ اشرح كورونا الآنود والكاثود.

١–١١ صف باختصار الآليات المختلفة للانهيار في المواد الصلبة.

١–١٢ ما التشجر والتتبع؟

١–١٣ ماذا نعني بالمتانة الذاتية لعازل صلب؟ واشرح الانهيار الكهربي للعوازل الصلبة.

١–١٤ اشرح الانهيار الحراري في العوازل الصلبة. وكيف تكون هذه الآلية أكثر أهمية من الآليات الأخرى.



توليد الجهود العالية d.c، a.c
Generation of High d.c & a.c Voltages

٢-١ مقدمة Introduction

توجد تطبيقات مختلفة للجهود d.c العالية في الصناعة، علوم الأبحاث الطبية، ...إلخ. نقل الجهد العالي d.c (HVDC) عبر كل من الخطوط الهوائية والكابلات تحت الأرض أصبحت أكثر شيوعاً. ويستخدم HVDC لاختبار كابلات HVAC ذات الأطوال الكبيرة حيث إن لها سعة كبيرة جداً وستتطلب قيم كبيرة جداً من التيارات إذا اختبرت على جهود HVAC. ولذلك فإن اختبارات الـ d.c على الكابلات a.c تكون مناسبة واقتصادية، حيث تعاني من حقيقة أن توزيع الإجهاد داخل المادة العازلة يكون مختلفاً عن شروط التشغيل العادية. في الصناعة تستخدم في الترسيب الكهروستاتيكي للرماد في وحدات القدرة الحرارية، الدهان الكهروستاتيكي، صناعة الأسمنت، أنظمة الاتصالات، ...إلخ. أيضاً يستخدم HVDC بتوسع في الفيزياء لتعجيل الجسيمات وكذلك في المعدات الطبية مثل أشعة X.

الطريقة الأكثر كفاءة لتوليد جهود d.c عالية هي خلال عملية التقويم rectification باستخدام دوائر مضاعفة الجهد voltage multiplier circuits. واستخدمت أيضاً المولدات الكهروستاتيكية لتوليد جهود d.c عالية.

وطبقاً للمواصفات القياسية IEEE 4-1978، فإن قيمة جهد الاختبار المباشر يُعرَّف بـ"القيمة الحسابية المتوسطة" V_d، ويعبر عنه رياضياً كالآتي:

$$V_d = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)dt \qquad (1.2)$$

حيث T= الفترة الزمنية لموجة الجهد ولها تردد $f = 1/T$.

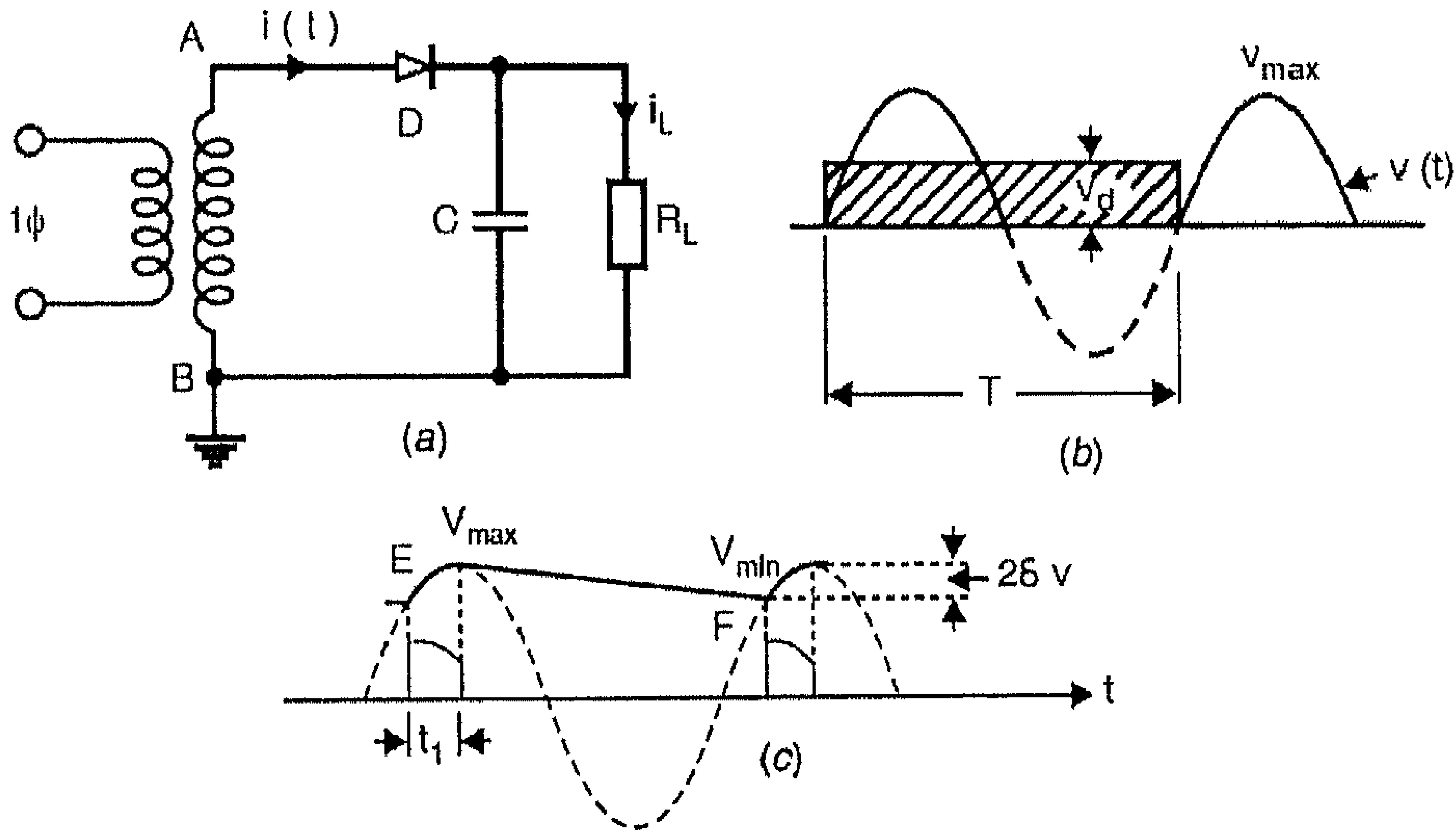
جهود الاختبار المتولدة باستخدام مقومات rectifiers لا تكون ثابتة في المقدار أبداً. وهي تنحرف عن القيمة المتوسطة دورياً وهذا الانحراف يعرف باسم "التموج" ripple. ويرمز لمقدار التموج بالرمز δV وهو يُعرَّف بنصف الفرق بين القيم القصوى والدنيا للجهد، أي:

$$\delta V = \frac{1}{2}(V_{max} - V_{min}) \tag{2.2}$$

ويُعرَّف معامل التموج بنسبة مقدار التموج إلى القيمة المتوسطة V_d أي $\delta V / V_d$. جهود الاختبار لا يجب أن يكون بها معامل تموج أكبر من 5% أو كما هو منصوص عليه في المواصفات القياسية لمعدة خاصة حيث مطالب شكل الجهد يمكن أن تختلف من تطبيق لآخر.

٢-٢ دائرة مُقوِّم نصف الموجة Half-Wave Rectifier Circuit

أبسط دائرة لتوليد جهد مستمر عالي هو مُقوِّم نصف الموجة الموضح في الشكل 2.1 هنا R_L هي مقاومة الحمل، C هي سعة المكثف لتنعيم جهد الخرج d.c.



الشكل 2.1: (a) مقوم مفرد الطور؛ (b) جهد الخرج بدون مكثف؛ (c) جهد الخرج مع مكثف

وإذا لم يكن المكثف موصلاً نحصل على جهد d.c نبضي [دفعي] pulsating d.c عند أطراف الخرج بينما مع المكثف C، ينخفض النبض عند أطراف الخرج. وبفرض المحول النموذجي والمقاومة الداخلية الصغيرة للدايود فأثناء التوصيل يشحن المكثف C إلى أقصى جهد V_{max} أثناء توصيل الدايود D. وبفرض عدم وجود حمل موصل، فإن الجهد d.c عبر المكثف

يبقى ثابت عند V_{max} بينما يتذبذب جهد الإمداد بين $\pm V_{max}$ وأثناء نصف الدورة السالب فإن جهد النقطة A يصبح $-V_{max}$ وبالتالي يجب أن يقنن الدايود لـ $2V_{max}$. وستكون هذه هي الحالة إذا تأرض المحول عند A بدلاً من B كما في الشكل (a)2.1. هذه الدائرة تعرف باسم "مُثنّي الجهد" voltage doubler لفيلارد Villard. والذي يؤخذ جهد الخرج له عبر D. هذا الجهد d.c –مع ذلك– يتذبذب بين صفر، $2V_{max}$ ويكون مطلوباً لدئراة التعاقب cascade circuit.

إذا حملت الدائرة، فإن جهد الخرج لا يبقى ثابتاً عند V_{max}. فبعد نقطة E [الشكل (c)2.1] يصبح جهد الإمداد أقل من جهد المكثف، ويتوقف الدايود عن التوصيل. ولا يستطيع المكثف أن يفرغ في النظام a.c بسبب فعل الاتجاه الواحد للدايود. وبدلاً من ذلك يتدفق التيار الآن خارج C ليؤسس التيار i_L خلال الحمل. وأثناء توقف هذه الطاقة، ينخفض أيضاً جهد المكثف عند معدل يعتمد على الثابت الزمني CR للدائرة ويصل إلى النقطة F المقابلة لـ V_{max}. وبعد F، يكون جهد الإمداد أكبر من جهد المكثف وبالتالي يبدأ الدايود D التوصيل ليشحن المكثف C مرة ثانية إلى V_{max} وأيضاً أثناء هذه الفترة يقوم بإمداد تيار إلى الحمل أيضاً. هذه النبضة الثانية $i_p\left(i_c+i_L\right)$ تكون ذات فترة دوام أقصر من نبضة الشحن الابتدائية حيث تخدم أساساً لتخزين الطاقة في C أثناء الإمداد للحمل. وهكذا أثناء كل نبضة من تيار الدايود واستمرار التيار أقل من نصف دورة، يستقبل الحمل تيار أكثر استمراراً من C.

بفرض أن الشحنة المزودة بواسطة المحول إلى الحمل أثناء فترة التوصيل t، والتي تكون صغيرة جداً لدرجة الإهمال، فإن الشحنة المزودة بالمحول إلى المكثف أثناء التوصيل تساوي الشحنة المزودة بواسطة المكثف إلى الحمل، لاحظ أن i_L □ i_c. أثناء دورة واحدة $T=1/f$ للجهد a.c، فإن الشحنة Q المنقولة للحمل R_L تعطى كالتالي:

$$Q=\int_T i_L(t)dt=\int_T \frac{V_{RL}(t)}{R_L}dt=IT=\frac{I}{f}$$

حيث I = القيمة المتوسطة لخرج d.c $i_L(t)$.

$V_{RL}(t)$ = الجهد d.c الذي يشمل تموجات كما هو مبين في الشكل (c)2.1.

هذه الشحنة تُمد بواسطة المكثف عبر فترة T عندما يتغير الجهد من V_{max} إلى V_{min} عبر فترة تقريبية T وبإهمال فترة توصيل الدايود.

نفترض عند أي زمن يكون جهد المكثف V وينخفض بكمية dV عبر زمن dt ولذلك فإن الشحنة المسلمة بواسطة المكثف أثناء هذا الزمن تكون:

$$dQ = C\,dV$$

ولذلك، إذا تغير الجهد من V_{max} إلى V_{min} فإن الشحنة المسلمة بواسطة المكثف تكون:

$$\int dQ = \int_{V_{max}}^{V_{min}} C\,dV = -C\left(V_{max} - V_{min}\right)$$

أو مقدار الشحنة المسلمة بواسطة المكثف تكون:

$$Q = C\left(V_{max} - V_{min}\right) \qquad (3.2)$$

وباستخدام المعادلة (2.2):

$$Q = 2\delta V\,C \qquad (4.2)$$

لذلك فإن:

$$2\delta V\,C = IT$$

أو

$$\delta V = \frac{IT}{2C} = \frac{I}{2f\,C} \qquad (5.2)$$

وتبين المعادلة (2.5) أن التموج في خرج أي مُقوِّم يعتمد على تيار الحمل وبارامترات الدائرة مثل التردد f وسعة المكثف C. حاصل الضرب $f\,C$ يكون –لذلك– عامل تصميم هام للمقوِّمات. فكلما زاد تردد الإمداد وكبرت قيمة مكثف الترشيح انخفضت قيمة التموج في خرج الـ d.c.

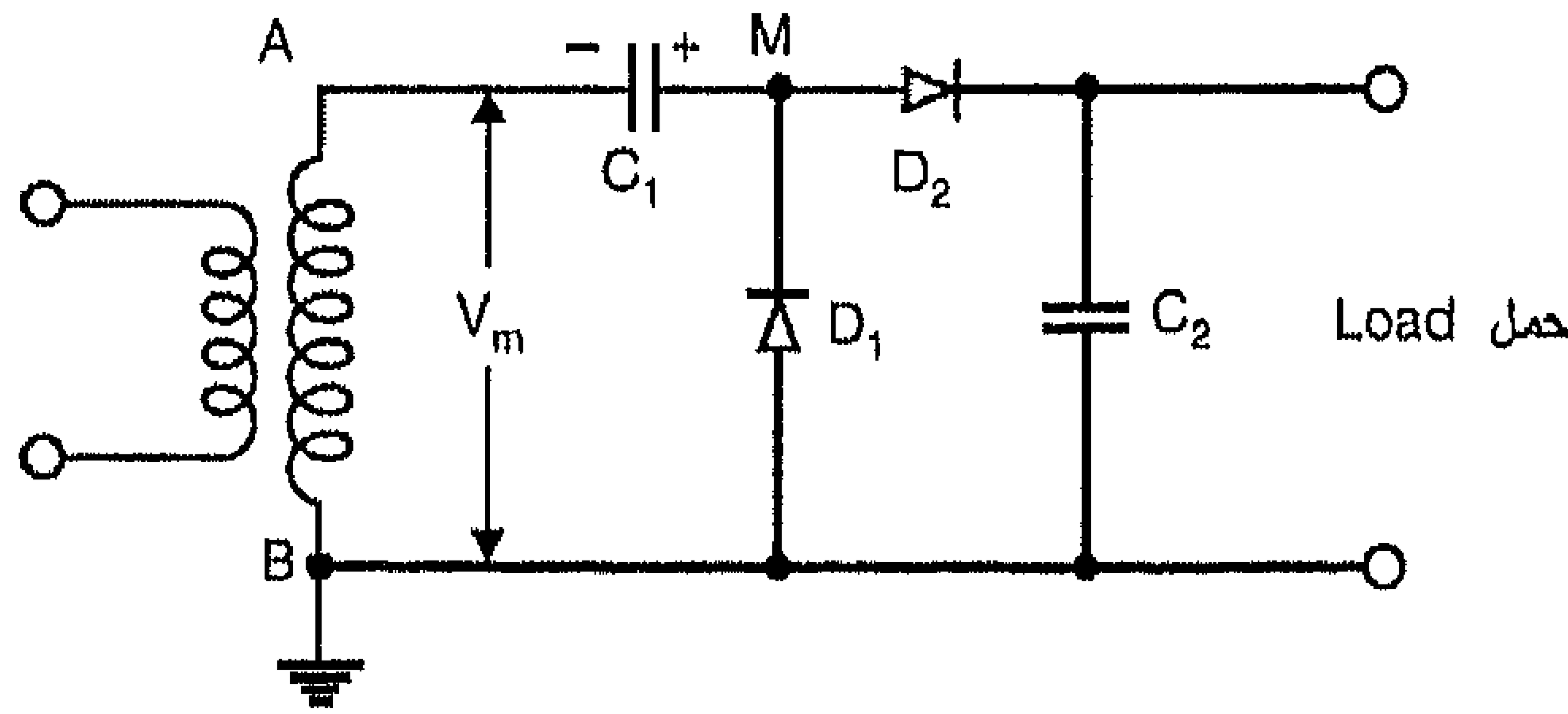
ويُعيب دوائر مقوِّم نصف الموجة مفردة الطور الآتي:

١. يكون حجم الدوائر كبير جداً إذا أردنا جهود خرج d.c نقية وعالية.

٢. يمكن أن يتشبع محول الضغط العالي إذا كانت سعة التيار المستمر تقارن مع التيار المتردد الأسمي [الاعتباري] للمحول.

ويجب ملاحظة أن كل الدوائر المأخوذة في الاعتبار هنا تكون قادرة على إمداد تيارات منخفضة نسبياً ولذلك تكون غير مناسبة لتطبيقات التيار العالي مثل نقل HVDC.

عندما يراد توليد جهود d.c عالية، يستخدم مُثنِّي جهد أو دوائر مضاعفة للجهد المتعاقبة cascaded voltage multiplier. أحد أهم دوائر مثني الجهد doubler circuit هي دائرة جريناشير Greinacher الموضحة في الشكل 2.2.



الشكل 2.2: دائرة مثنى الجهد لجريناشير

نفترض أن النقطة B أكثر إيجاباً بالنسبة للنقطة A وأن الدايود D_1 يوصل شاحناً المكثف C_1 إلى V_{max} مع قطبية كالمبينة في الشكل 2.2. أثناء نصف الدورة التالي يرتفع الطرف A للمكثف C_1 إلى V_{max} وبالتالي يحصل الطرف M على جهد $2V_{max}$. وهكذا فإن المكثف C_2 يشحن إلى $2V_{max}$ خلال D_2 . عادة سيكون الجهد عبر الحمل أقل من $2V_{max}$ ويعتمد ذلك على الثابت الزمني للدائرة $C_2 R_L$.

٢-٣ دائرة مضاعف الجهد كوكروفت- والتون Cockroft-Walton Voltage Multiplier Circuit

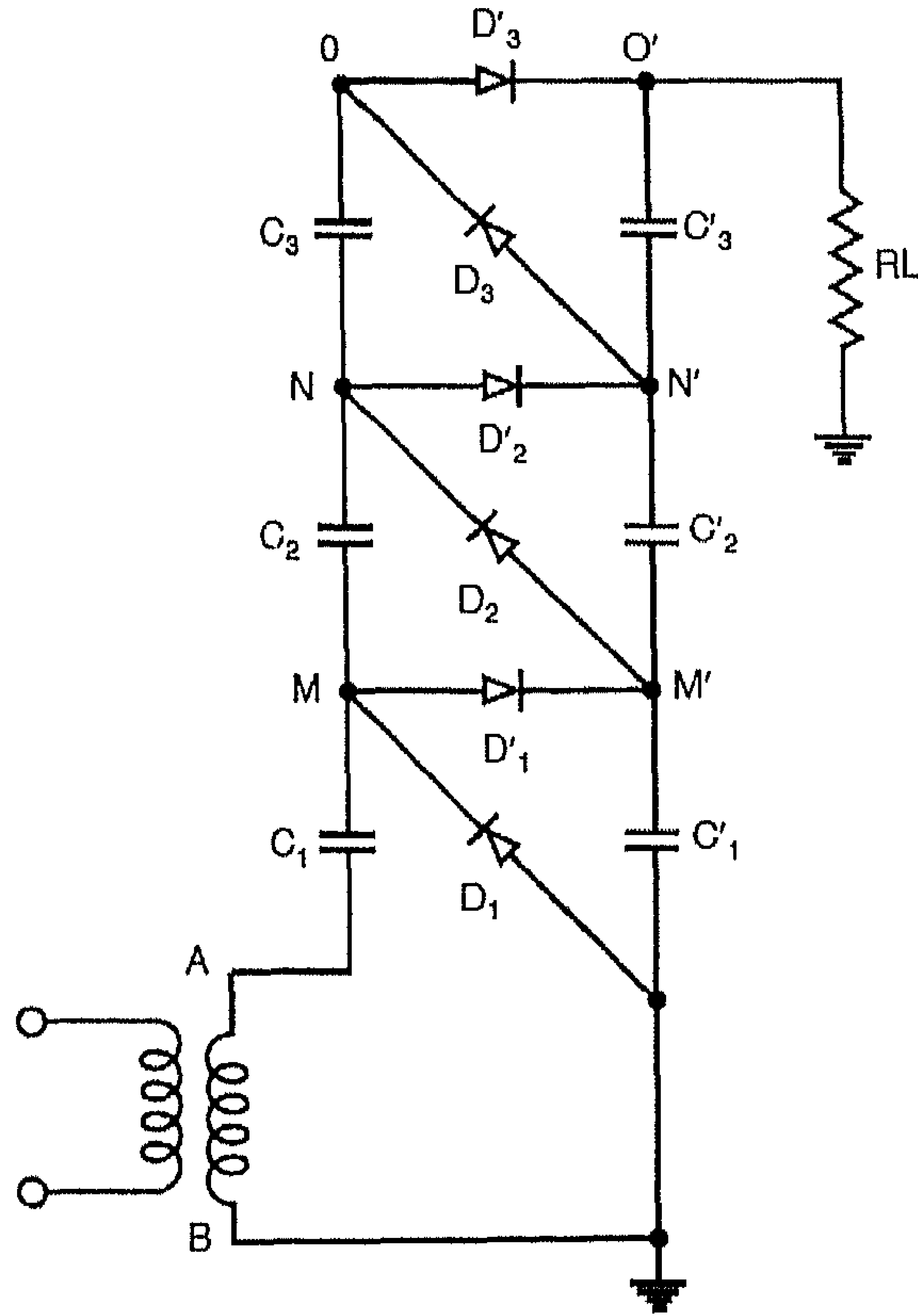
في عام 1932 اقترح كل من كوكروفت ووالتون تحسينات على الدائرة المطورة بواسطة جريناشير لإنتاج جهود d.c عالية. ويوضح الشكل 2.3 دائرة تعاقبية مفردة الطور متعددة المراحل من طراز كوكروفت—والتون.

التشغيل بدون حمل No Load Operation

الجزء $ABM'MA$ مطابق تماماً لدائرة جريناشير والجهد عبر C يصبح $2V_{max}$ عندما يكون جهد M $2V_{max}$.

أثناء نصف الدورة التالي عندما تصبح B موجبة بالنسبة لـ A ، يهبط جهد A ، ولذلك يهبط جهد N أيضاً ويصبح أقل من الجهد عند M' وبالتالي يشحن C_2 خلال D_2. وعند نصف الدورة التالي تصبح A أكثر إيجابية ويرتفع جهد M ، N ليشحن C_2' خلال D_2'. وفي النهاية تشحن كل المكثفات C_1' ، C_2' ، C_3' ، C_1 ، C_2 ، C_3. الجهد عبر عمود المكثفات الذي يتكون من C_1 ، C_2 ، C_3 يظل متذبذباً حيث جهد الإمداد يكون متردداً. ولذلك، فإن هذا العمود يعرف باسم "العمود المتذبذب". ومع ذلك، فالجهد عبر المكثفات C_1' ، C_2' ، C_3' يبقى ثابتاً ويعرف باسم "عمود التنعيم". الجهود عند M' ، N' ، O' تكون $2V_{max}$ ،

$4V_{max}$ ، $6V_{max}$. لذلك، يكون الجهد عبر كل المكثفات هو $2V_{max}$ فيما عدا C_1 حيث يكون V_{max} فقط. جهد الخرج الإجمالي يكون $2nV_{max}$ حيث n هو عدد المراحل. وهكذا فإن استخدام مراحل متعددة مرتبة بالأسلوب الموضح يمكننا من الحصول على جهد عالي جداً. الإجهاد المتساوي للعناصر [كل من المكثفات والدايودات] المستخدمة يكون مساعداً جداً ويروج لتصميم معياري لهذه المولدات.



الشكل 2.3: دائرة كوكروفت–والتون مفردة الطور متعددة المراحل

تحميل المولد Generator Loaded

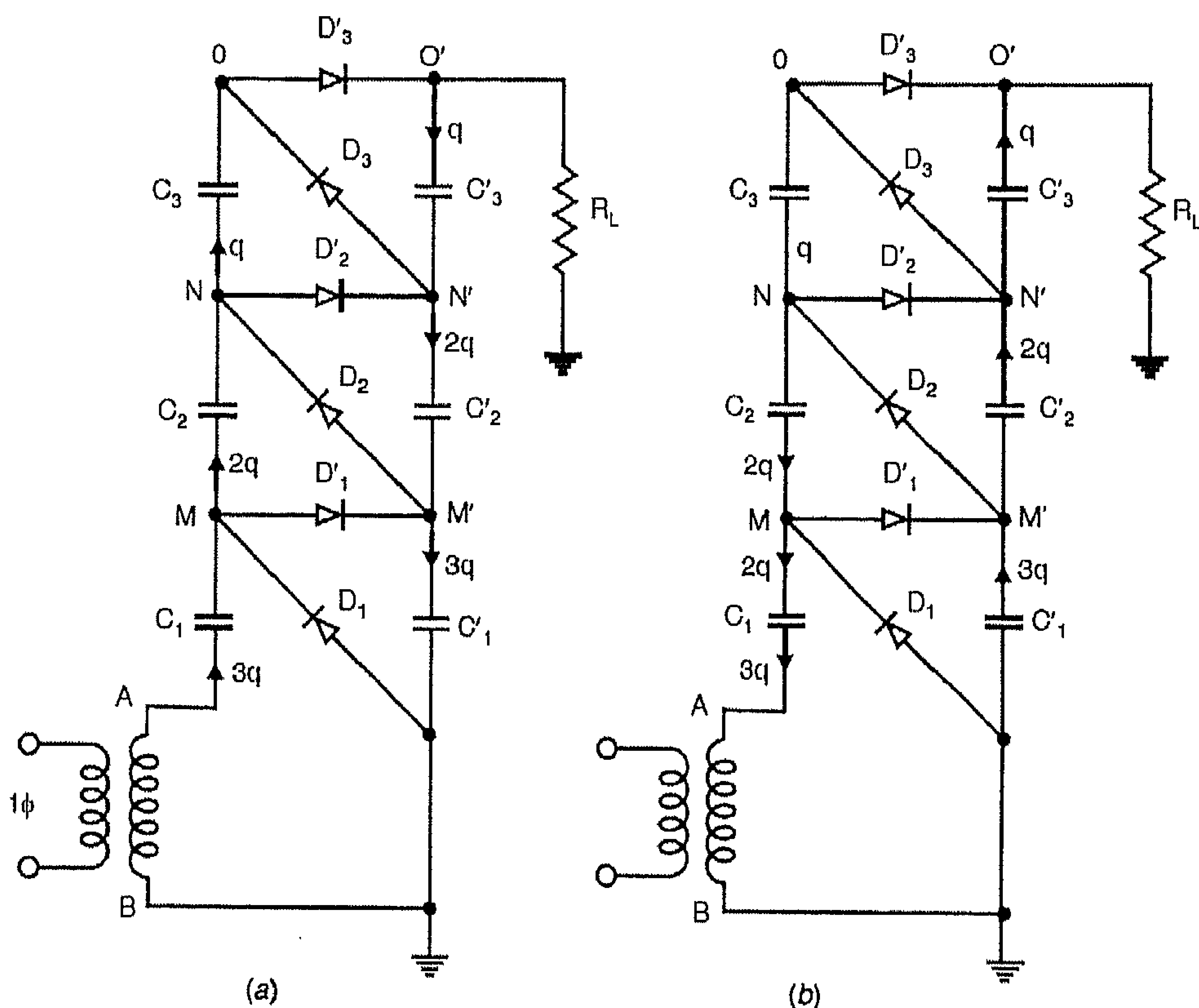
عندما يُحَمَّل المولد، لن يصل جهد الخرج إلى القيمة $2nV_{max}$ أبداً. أيضاً، ستتكون موجة الخرج من تموجات على الجهد. وهكذا يجب علينا أن نتعامل مع كميتان: هبوط الجهد ΔV والتموجات δV .

نفترض شحنة q تُنقل للحمل كل دورة. هذه الشحنة هي $q = 1/f = IT$. وتأتي

الشحنة من عمود التنعيم، أي سلسلة التوصيلات C_1' ، C_2' ، C_3'. إذا لم تنقل أي شحنة أثناء T من الرصة عبر D_1 ، D_2 ، D_3 إلى العمود المتذبذب فإن تموج القمة للقمة سيكون هو:

$$2\delta V = IT \sum_{n=0}^{n} \frac{1}{C_i'} \qquad (6.2)$$

ولكن عملياً فإن الشحنات تنتقل. ويتم شرح العملية بمساعدة الدوائر في الشكل 2.4(a)، 2.4(b).



الشكل 2.4: (a) شحن عمود التنعيم؛ (b) شحن العمود المتذبذب

الشكل 2.4(a) يوضح النظام عندما تكون النقطة A موجبة أكثر بالنسبة لـ B ويحدث شحن عمود التنعيم ويوضح الشكل 2.4(b) النظام عندما تصبح في نصف الدورة التالي النقطة B موجبة أكثر بالنسبة لـ A ويحدث شحن العمود المتذبذب. بالرجوع إلى الشكل 2.4(a) نفترض أن جهد النقطة O' هو الآن $6V_{max}$. هذه التفريغات خلال مقاومة الحمل ونفترض أن

الشحنة المفقودة هي $q = IT$ عبر الدورة. وهذا يجب أن يعاد اكتسابه أثناء دورة الشحن [الشكل 2.4(a)] للتشغيل المستقر للمولد. ولذلك فإن C'_3 يستمد شحنة q من C_3. ولذلك فإن C_2 يجب أن تكتسب شحنة $2q$ حتى يمكنها أن تمد شحنة q للحمل، q إلى C_3 في نصف الدورة التالي كما اصطلح بواسطة كوكروفت ووالتون كدورة انتقال [الشكل 2.4(b)]. وبالمثل C'_1 يجب أن تكتسب لأسباب الاستقرار شحنة $3q$ حتى يمكنه أن يمد شحنة q إلى الحمل، $2q$ إلى المكثف C_2 في نصف الدورة التالي.

أثناء دورة الانتقال الموضحة في الشكل 2.4(b)، توصل الدايودات D_1 ، D_2 ، D_3 عندما تكون B موجبة بالنسبة لـ A. وهنا ينقل C'_2 شحنة q إلى C_3، وينقل C'_1 شحنة $2q$ إلى C_2 ويعطي المحول شحنة $3q$.

ولدائرة مكونة من عدد n مرحلة سيكون التموج الإجمالي:

$$2\delta V = \frac{I}{f}\left(\frac{1}{C'_n} + \frac{2}{C'_{n-1}} + \frac{3}{C'_{n-2}} + \ldots + \frac{n}{C'_1}\right)$$

أو

$$\delta V = \frac{I}{2f}\left(\frac{1}{C'_n} + \frac{2}{C'_{n-1}} + \frac{3}{C'_{n-2}} + \ldots + \frac{n}{C'_1}\right) \qquad (7.2)$$

من المعادلة (2.7) من الواضح أنه في دائرة متعددة المراحل يكون المكثف السفلي مسئولاً عن معظم التموجات –ولذلك– يكون من المرغوب فيه زيادة السعة في المراحل السفلى. ومع ذلك، فإن ذلك يكون معارضاً من وجهة نظر دائرة الجهد العالي حيث إذا كان الحمل كبيراً وجهد الحمل ينخفض، فإن المكثفات الأصغر [داخل العمود] سوف يزداد إجهادها. ولذلكن تستخدم مكثفات ذات قيمة متساوية في الدوائر العملية أي أن $C'_n = C'_{n-1} = \ldots = C'_1 = C$ ويعطى التموج كالآتي:

$$\delta V = \frac{I}{2f\,C}\frac{n(n+1)}{2} = \frac{I\,n(n+1)}{4f\,C} \qquad (8.2)$$

الكمية الثانية التي يجب أن نقيمها هي هبوط الجهد ΔV وهي الفرق بين جهد اللاحمل النظري $2nV_{max}$ وجهد الحمل. ولكي نحصل على هبوط الجهد ΔV نرجع إلى الشكل 2.4(a).

وهنا يكون C_1' ليس مشحوناً حتى الجهد الكامل $2V_{max}$ ولكن يكون حتى $2V_{max}-3q/C$ وذلك بسبب الشحنة المعطاة خلال C_1 في دورة واحدة والتي تعطي هبوط جهد مقداره $3q/C=3I/f\,C$.

هبوط الجهد في المحول يفترض أن يكون مهملاً. وهكذا يشحن C_2 إلى الجهد:

$$\left(2V_{max}-\frac{3I}{f\,C}\right)-\frac{3I}{f\,C}$$

وحيث إن الخفض في الجهد عبر C_3' مرة أخرى هو $3I/f\,C$. لذلك، فإن C_2' يحصل على الجهد:

$$2V_{max}-\left(\frac{3I+3I+2I}{f\,C}\right)$$

وفي مولد من ثلاث مراحل:

$$\Delta V_1=\frac{3I}{f\,C}$$

$$\Delta V_2=\left[2\times3+(3-1)\right]\frac{I}{f\,C}$$

$$\Delta V_3=(2\times3+2\times2+1)\frac{I}{f\,C}$$

وبصفة عامة في مولد مكون من n مرحلة:

$$\Delta V_n=\frac{nI}{f\,C}$$

$$\Delta V_{n-1}=\frac{I}{f\,C}\left[2n+(n-1)\right]$$

$$\Delta V_{n-2}=\frac{I}{f\,C}\left[2n+2(n-1)+(n-2)\right]$$

$$\vdots$$

$$\Delta V_1=\frac{I}{f\,C}\left[2n+2(n-1)+2(n-2)+\ldots+2\times3+2\times2+1\right]$$

$$\Delta V=\Delta V_n+\Delta V_{n-1}+\ldots+\Delta V_1$$

وبعد حذف I/fC يمكن كتابة المتسلسلة كالتالي:

$$T_n = n$$
$$T_{n-1} = 2n + (n-1)$$
$$T_{n-2} = 2n + 2(n-1) + (n-2)$$
$$T_{n-3} = 2n + 2(n-1) + 2(n-2) + (n-3)$$
$$\vdots$$
$$T_1 = 2n + 2(n-1) + 2(n-2) + \ldots + 2\times3 + 2\times2 + 1$$
$$T = T_n + T_{n-1} + T_{n-2} + \ldots + T_1$$

وبعد عدد من العمليات الرياضية نحصل على:

$$T = \frac{2}{3}n^3 + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \tag{9.2}$$

وهنا تساهم مرة ثانية المكثفات السفلى في هبوط الجهد ΔV ولذلك فمن المفيد زيادة سعتهم بخطوات مناسبة. ومع ذلك، فإن مضاعفة C_1 يكون مناسباً حيث هذا المكثف عليه أن يجابه نصف الجهد فقط للمكثفات الأخرى. لذلك، ΔV_1 تنخفض بالكمية nI/fC التي تخفض ΔV لكل مرحلة بنفس الكمية أي بـ:

$$n \cdot \frac{nI}{2fC}$$

إذاً

$$\Delta V \approx \frac{I}{fC}\left(\frac{2}{3}n^3 - \frac{n}{6}\right) \tag{10.2}$$

إذا كانت $n \geq 4$ نجد أن الحد الخطي يمكن إهماله، ولذلك يمكن تقريب هبوط الجهد إلى:

$$\Delta V = \frac{I}{fC} \cdot \frac{2}{3}n^3 \tag{11.2}$$

ويعطى أقصى جهد خرج بالآتي:

$$V_{0\,max} = 2nV_{max} - \frac{I}{fC} \cdot \frac{2}{3}n^3 \tag{12.2}$$

واضح من المعادلة (2.12) أنه بالنسبة لعدد معطى من المراحل، تردد معطى وسعة لكل مرحلة، فإن جهد الخرج ينخفض خطياً مع تيار الحمل I. ولحمل معطى –مع ذلك– فإن $V_0 = \left(V_{0\,max} - V\right)$ يمكن أن يرتفع ابتدائياً مع عدد المراحل n ، ويصل إلى قيمة قصوى ولكنه يضمحل فيما بعد عدد أمثل للمراحل. العدد الأمثل للمراحل بفرض V_{max}، I ، f ، C ثوابت يمكن الحصول عليه لأقصى قيمة لـ $V_{0\,max}$ بتفاضل المعادلة (2.12) بالنسبة لـ n ومساواتها بالصفر.

$$\frac{dV_{max}}{dn} = 2V_{max} - \frac{2}{3}\frac{I}{f\,C}3n^2 = 0$$

$$= V_{max} - \frac{I}{f\,C}n^2 = 0$$

أو

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{V_{max} f\,C}{I}} \qquad (13.2)$$

حيث n_{opt} = عدد المراحل الأمثل.

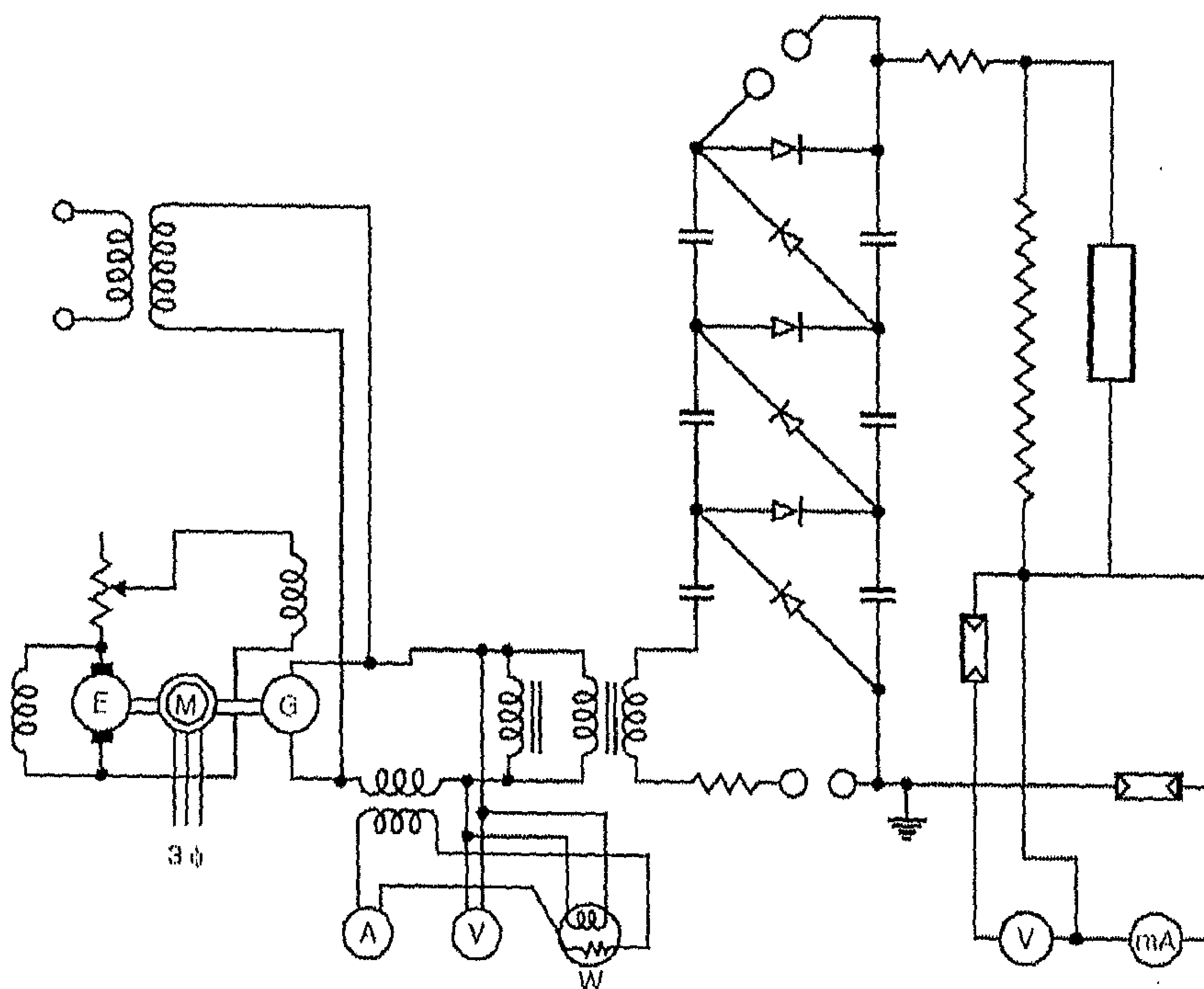
وبالتعويض عن n_{opt} في المعادلة (2.12) يصبح لدينا:

$$\left(V_{0\,max}\right)_{max} = \sqrt{\frac{V_{max} f\,C}{I}}\left(2V_{max} - \frac{2I}{3f\,C}\frac{V_{max} f\,C}{I}\right)$$

$$= \sqrt{\frac{V_{max} f\,C}{I}} \cdot \frac{4}{3}V_{max} \qquad (14.2)$$

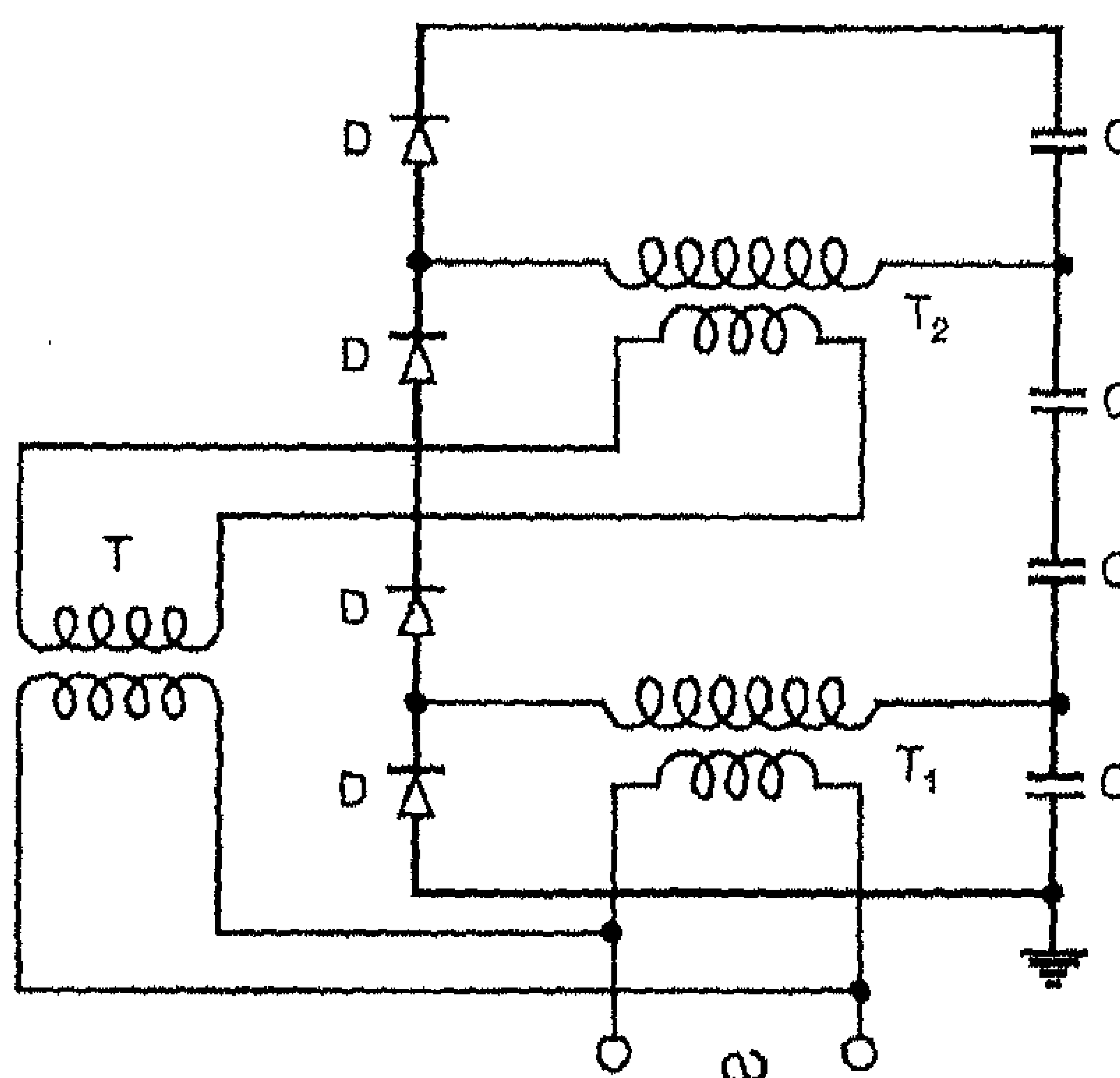
ونلاحظ أنه أكثر اقتصاداً استخدام مكثف صغير قيمة السعة عالي التردد لتخفيض التموجات أو هبوط الجهد وليس منخفض التردد عالي السعة.

وتستخدم المولدات التعاقبية طراز كوكروفت–والتون وتصنع عبر العالم هذه الأيام. ويوضح الشكل 2.5 دائرة نموذجية. وعامة يكون مطلوب تيار مستمر حتى 20 mA للجهود العالية ما بين 1 MV ، 2 MV . وفي حالة طلب قيمة أعلى من التيار، يتم تطوير مقوِّمات متعاقبة متماثلة. وهي تتكون أساساً من مقومين في تعاقب مع عمود تنعيم مشترك. المقوِّم المتعاقب المتماثل يكون له هبوط جهد أصغر وأيضاً تموج جهد أصغر من المتعاقب البسيط. دخل التيار المتردد للدوائر المنفصلة يجب أن يزود عند جهد عالي مناسب، ويمكن تنفيذ ذلك بواسطة محول عازل.



الشكل 2.5: دائرة كوكروفت نموذجية

الشكل 2.6 يوضح دائرة مقوٍّم تعاقبي نموذجي. وتتكون كل مرحلة من محول واحد يغذي مقوٍّمين نصف موجة.

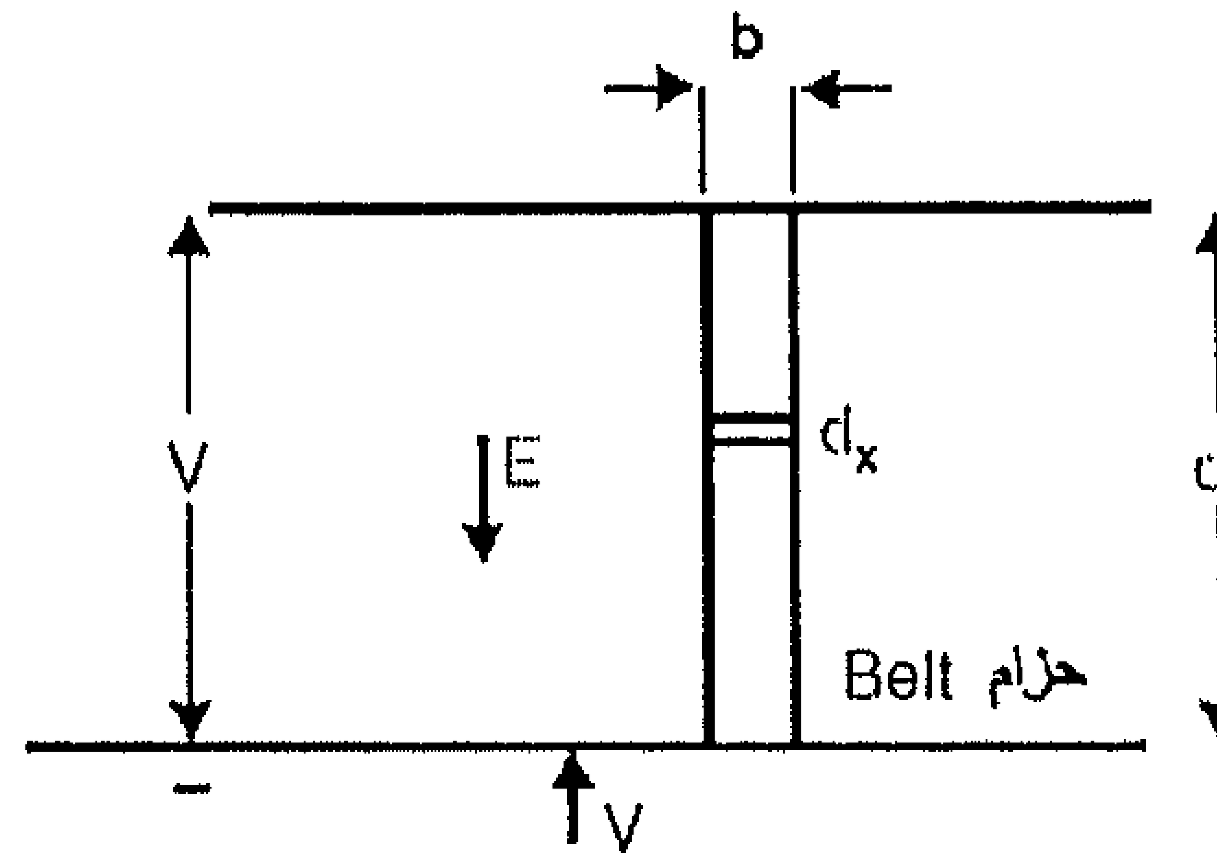


الشكل 2.6: دائرة مقوّم تعاقبي

وحيث إن مكثفات تخزين مقومات نصف الموجة هذه تكون متصلة على التوالي فإن لفات h.v. لـ T_1 لا يمكن أن تؤرض. وهذا يعني أن العزل الرئيسي بين اللفات الابتدائية والثانوية لـ T_1 يجب أن تُعزل لجهد d.c مقداره V_{max}، أي جهد الذروة لـ T_1. وهو نفس المطلوب لـ T_2 أيضاً ولكن هذه المرة تكون لفات الجهد العالي عند جهد مقداره $3V_{max}$. وسيكون من الصعب التزود بالعزل الرئيسي كله داخل هذا المحول، فالمحول العازل T يمد T_2. تعاقب كل مرحلة سيتطلب محول عازل إضافي مما يجعل هذه الدائرة أقل اقتصاداً لأكثر من مرحلتين.

٢-٤ المولد الكهروستاتيكي Electrostatic Generator

في المولدات الكهرومغنطيسية، تتحرك الموصلات التي تحمل تياراً خلال القوى الكهرومغنطيسية التي تؤثر عليهم. وخلافاً عن المولدات، فإن المولدات الكهروستاتيكية تحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية مباشرة. فالشحنات الكهربية تتحرك ضد قوة المجالات الكهربية، ولذلك نحصل على طاقة وضع أعلى عند تكلفة الطاقة الميكانيكية. ويوضح الشكل 2.7 شرح المبدأ الأساسي للتشغيل.



الشكل 2.7: المبدأ الأساسي لتشغيل المولد الكهروستاتيكي

يتحرك حزام [سير] معزول بسرعة منتظمة v في مجال كهربي شدته $E(x)$. نفترض أن عرض السير هو b وكثافة الشحنة هي σ وافترض طول dx من السير، وتكون الشحنة $dq = \sigma b\, dx$.

القوة المكتسبة بواسطة هذه الشحنة [أو المكتسبة بواسطة السير] تكون:

$$dF = E\, dq = E\, \sigma b\, dx$$

أو

$$F = \sigma b \int E\, dx$$

وعادة ما يكون المجال الكهربي منتظم:

$$\therefore \quad F = \sigma b V$$

القدرة المطلوبة لتحريك السير:

$$= \text{السرعة} \times \text{القوة}$$

$$= F v = \sigma b V v \qquad (15.2)$$

والآن يكون التيار:

$$I = \frac{dq}{dt} = \sigma b \frac{dx}{dt} = \sigma b v \qquad (16.2)$$

إذاً القدرة المطلوبة لتحريك السير هي:

$$P = F v = \sigma b V v = V I \qquad (17.2)$$

وبفرض عدم وجود مفقودات، فإن خرج القدرة يساوي أيضاً $V I$.

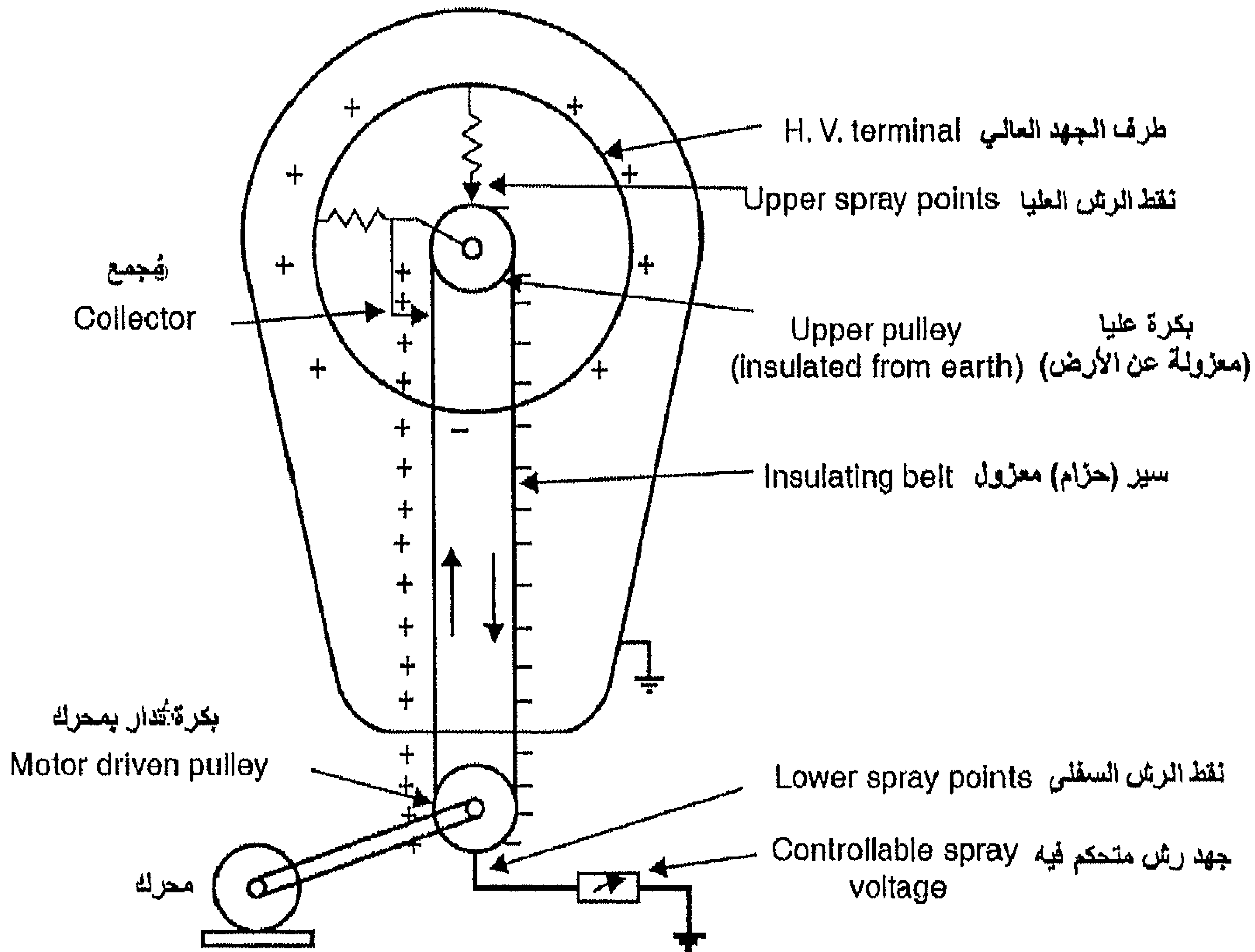
الشكل 2.8 يوضح مولد كهروستاتيكي مُدار بسير والذي تم تصميمه بواسطة فان دي جراف Van de Graaf في عام 1931. حيث يدور سير معزول عبر بكرات. عرض السير يمكن أن يكون من سنتيمترات قليلة إلى أمتار وهو يدار عند سرعة حوالي m/s (15–30) بواسطة محرك موصل بالبكرة السفلية. ويشحن السير بالقرب من البكرة السفلية كهروستاتيكياً بواسطة نظام إثارة. وتتكون وحدة رش الشحنة السفلية من عدد من الإبر موصلة بالمصدر d.c المتحكم فيه [من 10 kV إلى 100 kV] حتى يستمر التفريغ بين النقط والسير. وتنقل الشحنة بواسطة السير إلى الطرف العلوي حيث تجمع من السير بواسطة نقط التفريغ الموصلة إلى داخل الإلكترود المعدني المعزول الذي يمر من خلاله السير. والمعدة كلها مغلفة في خزان معدني مؤرض ممتلئ بغازات عازلة ذات متانة عزل جيدة مثل SF_6، ...إلخ. وذلك لكي يمكن رفع جهد الإلكترود إلى جهد أعلى نسبياً بدون تفريغات كورونا أو لجهد معين سينتج حجم صغير للمعدة. أيضاً، يجب أن يكون شكل إلكترود الجهد العالي بحيث يكون ميل السطح للمجال الكهربي منتظماً لتنخفض مرة ثانية تفريغات الكورونا، ولذلك يكون من المرغوب فيه تجنب الكورونا كلياً. شكل الإلكترود الأكثر تفضيلاً هو الكرة المعزولة لأنه سيحفظ مجال منتظم E مع جهد E_r حيث r هو نصف قطر الكرة.

وبمجرد أن يجمع إلكترود الـ h.t. الشحنات فإن جهده يرتفع. ويعطى الجهد عند أي لحظة بـ $V = q/C$ حيث q هي الشحنة المجمعة عند تلك اللحظة. ويبدو كما لو إذا

تجمعت الشحنة لزمن طويل فإن أي كمية من الجهد يمكن أن تتجمع. ومع ذلك، فعند ارتفاع جهد الإلكترود، فإن المجال الناشئ بواسطة الإلكترود يزداد وذلك يمكن أن يؤين الوسط المحيط و-لذلك- فإن هذا سيكون قيمة محددة من الجهد. عملياً، ينشأ توازن عند جهد نهائي يكون بحيث إن تيار الشحن الذي يساوي

$$\left(I = C\frac{dV}{dt}\right)$$

يكون مساوياً لتيار التفريغ الذي سيشمل تيار الحمل وتيارات التسرب وفقد الكورونا. نظام السير المتحرك أيضاً يُشوِّه المجال الكهربي -ولذلك- يوضع داخل مجال مناسب الشكل متدرج الحلقات. ويتم التزود بالتدرج بواسطة مقاومات وعناصر تفريغ كورونا إضافية.



الشكل 2.8: مولد فان دي جراف

ويوضع نظام إبرة المجمع بالقرب من النقطة التي يدخل منها السير إلى طرف h.t. ويمكننا نظام نقطة ثاني يثار بواسطة نظام حث-ذاتي من شحن السير الهابط إلى قطبية معاكسة لتلك الخاصة بالطرف وهكذا فإن معدل شحن الأخير -لسرعة معطاة- يتضاعف. ويتطلب نظام

الحث الذاتي عزل البكرة العليا وخفضها عند جهد أعلى من ذلك الخاص بالطرف h.t. وذلك بتوصيل البكرة بنظام إبرة المجمع. ويتكون النظام أيضاً من صف من النقط [موضحين كنقط رش علوية في الشكل 2.8] موصلة إلى داخل الطرف h.t. وموجهة في اتجاه البكرة فوق نقط الدخول إلى الطرف. وعندما تكون البكرة عند جهد أعلى [موجب]، فالشحنات السالبة بسبب تفريغ الكورونا عند نقط الرش العلوية تجمع بواسطة السير. وهذا يعادل أي شحنة موجبة متبقية على الحزام وتترك زيادة من الشحنات السالبة على السير الهابط حتى يتعادل بواسطة نقط الرش السفلى. وحيث إن هذه الشحنات السالبة تترك الطرف h.t.، فإن جهد الطرف h.t. يرتفع بنفس الكمية المقابلة.

ولكي نحصل على تقدير تقريبي للتيار المستمد بواسطة المولد، دعنا نفترض أن المجال الكهربي E يكون عمودياً على السير ويكون متجانساً.

ونحن نعرف أن $D = \varepsilon_0 E$ حيث D هي كثافة التدفق وحيث إن الوسط حول الطرف h.t. هو الهواء حيث $\varepsilon_r = 1$، $\varepsilon_0 = 8.854\times10^{-12}$ F/meter. فحسب قانون جاوس، $D = \sigma$ كثافة شحنة السطح، لذلك:

$$D = \sigma = \varepsilon_0 E \qquad (18.2)$$

وبفرض أن $E = 30$ kV/cm أو 30,000 kV/m

$$\sigma = 8.854\times10^{-12}\times3000\times10^{3} = 26.562\times10^{-6}\ \text{C/m}^2$$

وبافتراض أنه لنظام نموذجي $b = 1$ m وسرعة السير $v = 10$ m/sec. وباستخدام المعادلة (2.12)، فإن التيار المستمد من المولد يعطى كالآتي:

$$\begin{aligned} I &= \sigma b v \\ &= 26.562\times10^{-6}\times1\times10 = 26.562\times10^{-5}\ \text{Amp} = 265\ \mu\text{A} \end{aligned}$$

من المعادلة (2.16) يتضح أن التيار I يعتمد على σ، b، v. عرض السير b والسرعة v تكون محدودة لأسباب ميكانيكية، ويمكن زيادة التيار بالحصول على قيم عالية لـ σ. كثافة الشحنة σ يمكن أن تزداد باستخدام غازات ذات متانة عزل كهربي أعلى حتى يمكن زيادة شدة التيار الكهربي E بدون بدء تأين الوسط المحيط بطرف الـ h.t. ومع ذلك، فمع كل هذه الترتيبات تكون تيارات دائرة القصر الفعلية محدودة فقط بعدة mA قليلة حتى بالنسبة للمولدات الكبيرة.

مميزات المولد Advantages of the Generator

١. يمكن توليد جهود عالية جداً بسهولة.

٢. خالي من تموجات الجهد.

٣. تحكم منضبط ومرن.

عيوب المولد Disadvantages of the Generator

١. خرج تيار منخفض.

٢. قيود على سرعة السير بسبب ميله للتذبذب، مما يجعل من الصعب الحصول على تدرج دقيق للمجالات الكهربية.

وتستخدم هذه المولدات في معامل الفيزياء النووية لتعجيل الجسيمات وعمليات أخرى تتصل بالأبحاث.

٢-٥ توليد الجهود a.c العالية Generation of High a.c Voltages

معظم شبكات النقل والتوزيع الحالية تعمل على الجهود a.c.، وبالتالي فإن معظم معدات الاختبار تكون مرتبطة بالجهود a.c العالية. أيضاً فإن معظم المعدات في النظام تكون أنظمة ثلاثية الطور 3-ϕ، المحول مفرد الطور الذي يعمل عند تردد قدرة هو الشكل الأكثر شيوعاً لمعدات الاختبار HVAC.

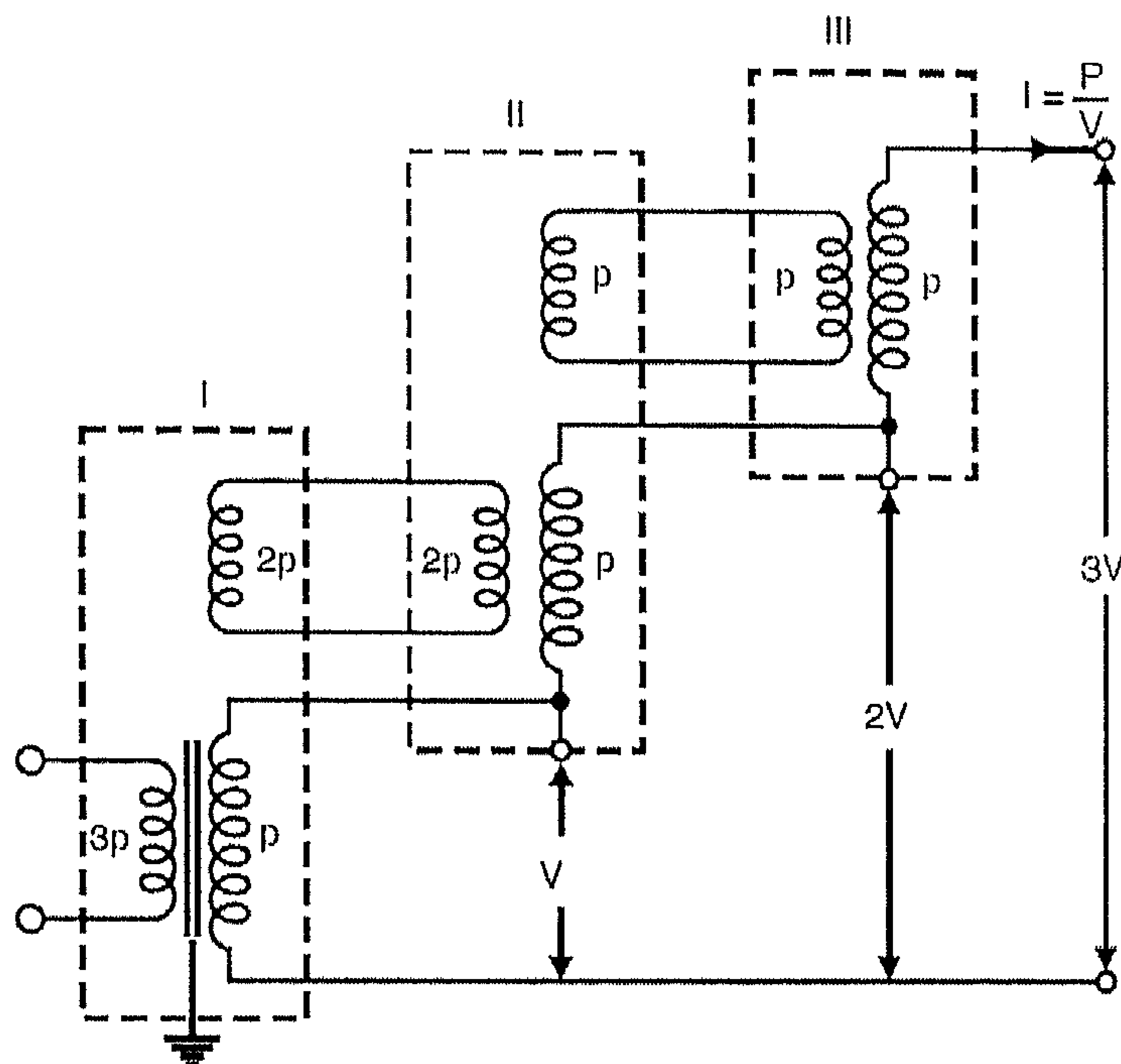
محولات الاختبار المستخدمة عادة للغرض لديها مقنن قدرة منخفض ومقننات جهد عالية. وتستخدم هذه المحولات أساساً لاختبارات الزمن القصير على معدات الجهد العالي. التيارات المطلوبة لهذه الاختبارات على المعدات المختلفة معطاة بأسفل:

- العوازل، .C.B، الجلب bushings، محولات القياس = (0.1–0.5) A
- محولات القدرة، مكثفات .h.v = (0.5–1) A
- الكابلات = 1 A وأكبر

تصميم محول الاختبار يكون مماثلاً لمحول الجهد المستخدم لقياس الجهد والقدرة في خطوط نقل الطاقة الكهربية. كثافة الفيض المختارة تكون منخفضة حتى لا تسحب تيار مغنطة كبير والذي يمكن أن يُشبع القلب core وينتج توافقيات أعلى higher harmonics.

٢-٥-١ المحولات التعاقبية Cascaded Transformers

لجهود أعلى من 400 kV، يكون مطلوب تعاقب محولين أو أكثر حسب مطالب الجهد. مع ذلك، فإن وزن الوحدة الإجمالي يقسم إلى وحدات مفردة –ولذلك– فإن النقل والإقامة يصبح أسهل. أيضاً –مع ذلك– فإن تكلفة المحول لجهد معطى يمكن أن تنخفض، حيث إن الوحدات المتعاقبة لا تحتاج أن تمتلك منفردة العزل المكلف والثقيل المطلوب في محولات المرحلة المفردة للجهود العالية التي تتعدى 345 kV . فقد وجد أن تكلفة العزل لهذه الجهود لوحدة مفردة يصبح متناسباً مع مربع جهد التشغيل.



الشكل 2.9: محول تعاقبي مكون من ثلاث مراحل

الشكل 2.9 يبين نظام أساسي لتعاقب ثلاثة محولات. ويوصل ابتدائي محول المرحلة الأولى بمصدر منخفض الجهد. ويتاح فولت عبر ثانوي هذا المحول. اللفيفة الثالثة [الإضافية] [لفيفة الإثارة] للمرحلة الأولى لها نفس عدد لفات الملف الابتدائي، وتغذي ابتدائي محول المرحلة الثانية. جهد اللفيفة الثالثة ثابت عند الجهد V للفات الثانوية كما في الشكل 2.9. اللفات الثانوية لمحول المرحلة الثانية موصل على التوالي مع اللفات الثانوية لمحول المرحلة الأولى،

لذلك متاح جهد $2V$ بين الأرضي وطرف ثانوي محول المرحلة الثانية. وبالمثل فإن محول المرحلة الثالثة موصل على التوالي بمحول المرحلة الثانية. وبذلك فإن جهد الخرج بين الأرضي وثانوي محول المرحلة الثالثة يكون $3V$. ويجب أن نلاحظ أن المراحل المنفصلة فيما عدا المرحلة الأخيرة يجب أن تتوافر بها محولات ثلاثية–اللفات وتبقى المرحلة الأخيرة –مع ذلك– ذات محول مكوّن من ملفين.

الشكل 2.9 يبين بناء خزان معدني من المحولات والملفات الثانوية غير مُقسمة. وهنا يكون طرف الجهد المنخفض للملف الثانوي موصلة بالخزان. خزان محول المرحلة الأولى يكون مؤرضاً. خزانات محولات المرحلة الثانية والثالثة لها جهد V، $2V$ على الترتيب فوق الأرضي – ولذلك– فإنها يجب أن تُعزل عن الأرض بعازل صلب مناسب. ومن خلال جلب .h.t، فإن أطراف اللفات الإضافية ولفات .h.v يجب أن تخرج حتى يمكن توصيلها لمحول المرحلة التالية.

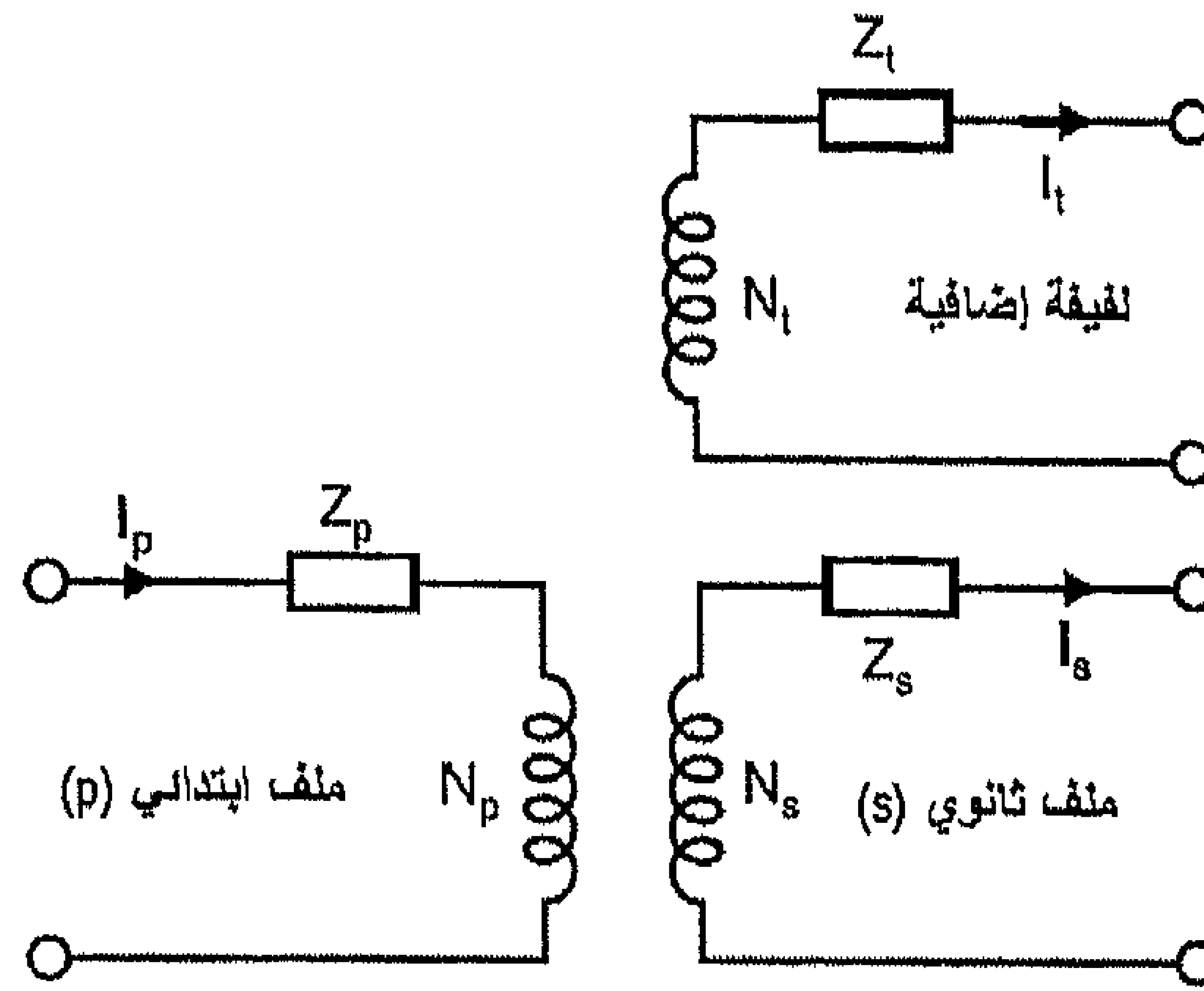
ومع ذلك، إذا كانت لفات الجهد العالي من طراز جهد نقطة المنتصف، فإن الخزانات تكون عند جهود 0.5 V ، 1.5 V، 2.5 V على الترتيب. هذا التوصيل يؤدي إلى بناء أرخص ويحتاج عزل الجهد العالي الآن أن يُصمم من أجل $V/2$ من جهد خزانه.

العيب الرئيسي لتعاقب المحولات هو أن المراحل السفلى من ابتدائيات المحولات تكون محملة أكثر مقارنة مع المراحل العليا.

في الشكل 2.9 يكون تحميل اللفات المختلفة مشار إليه بـ P بالنسبة لمحول الثلاث مراحل سيكون الخرج الإجمالي $V A$ هو $3V\,I=3P$ –ولذلك– ستحمل كل لفات ثانوية من المحول تيار I يساوي $I=P/V$. اللفات الابتدائية لمحول المرحلة الثالثة تحمل بـ P وأيضاً اللفيفة الإضافية لمحول المرحلة الثانية. لذلك، فإن ابتدائي محول المرحلة الثانية سيحمل بـ $2P$. وبنفس المنطق فقد وجد أن ابتدائي المرحلة الأولى سيحمل بـ P . لذلك، فأثناء تصميم الابتدائيات واللفائف الإضافية لهذه المحولات، يجب أخذ هذا العامل في الاعتبار.

معاوقة دائرة القصر الإجمالية للمحول التعاقبي من بيانات المراحل المنفصلة يمكن الحصول عليه. الدائرة المكافئة لمرحلة منفصلة موضحة في الشكل 2.10.

Z_p، Z_s، Z_t هي المعاوقات المرتبطة بالملفات الابتدائية والثانوية والإضافية على الترتيب. وترى المعاوقات impedances في توال مع محول ثلاثي الملفات مثالي مع العدد المقابل من اللفات N_p، N_s، N_t على الترتيب. ويتم الحصول على المعاوقات إما من النتائج المحسوبة أو العملية لثلاثة اختبارات دائرة قصر بين أي ملفين مأخوذين في نفس الوقت.



الشكل **2.10**: الدائرة المكافئة لمرحلة واحدة

والآن نفترض الآتي:

- Z_{ps} = معاوقة التسرب المقاسة على الجانب الابتدائي مع الثانوي مُقْصّر والإضافية مفتوحة.
- Z_{pt} = معاوقة التسرب المقاسة على الجانب الابتدائي مع الإضافية مقصرة والثانوي مفتوح.
- Z_{st} = معاوقة التسرب المقاسة على الجانب الثانوي مع الإضافية مقصرة والابتدائي مفتوح.

وإذا أُرجعت هذه المعاوقات المقاسة إلى الجانب الابتدائي فإن:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s$$
$$Z_{pt} = Z_p + Z_t$$
$$Z_{st} = Z_s + Z_t$$

وبحل هذه المعادلات، نحصل على:

$$\left.\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{2}\left(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}\right) \\ Z_s &= \frac{1}{2}\left(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}\right) \\ Z_t &= \frac{1}{2}\left(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (19.2)$$

وبفرض إهمال تيار المغنطة ، فإن مجموع الأمبير–لفات لكل اللفات يجب أن تساوي صفراً أي :

$$N_p I_p - N_s I_s - N_t I_t = 0$$

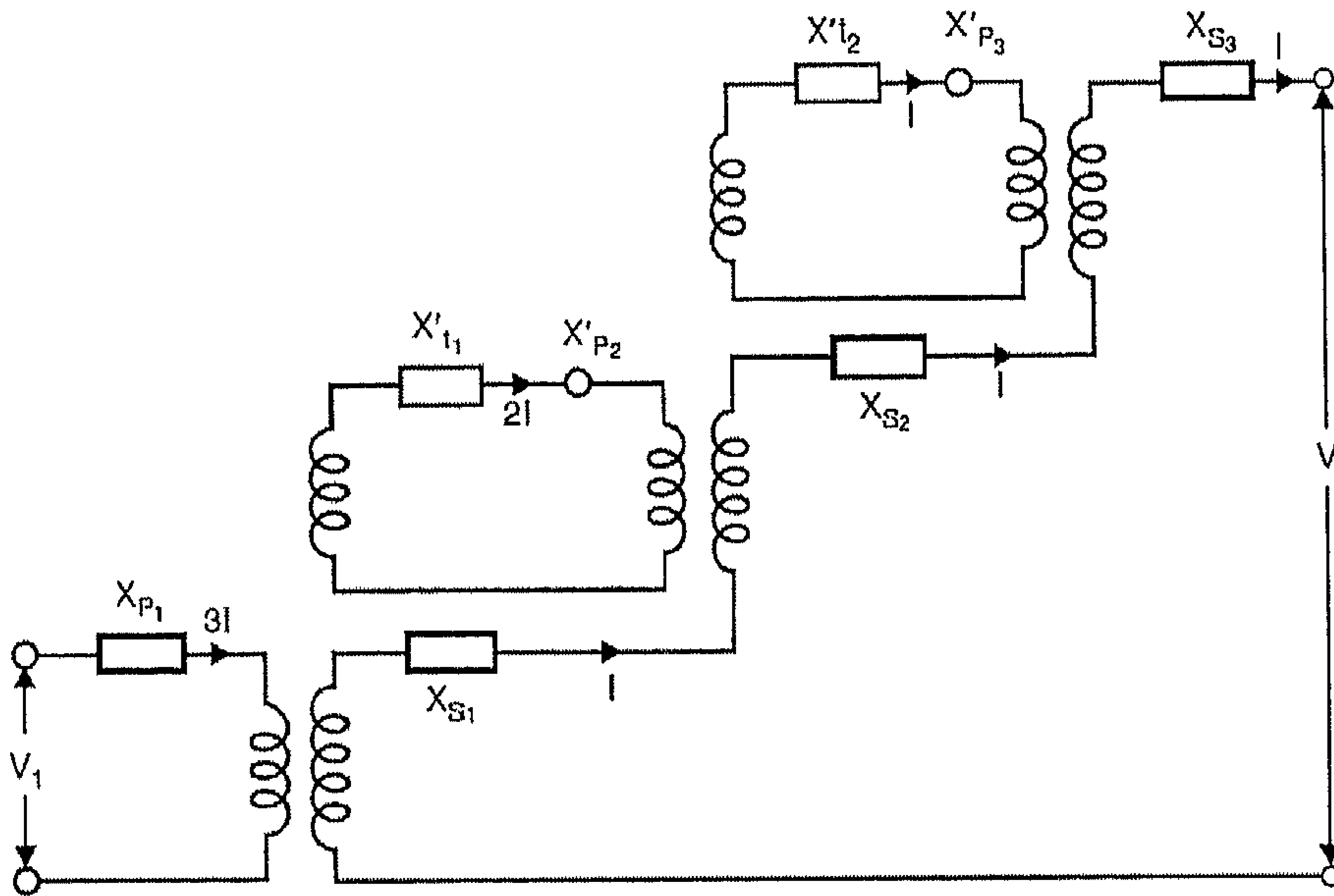
وبفرض محول عديم الفقد، نحصل على :

$$Z_p = jX_p$$

$$Z_s = jX_s$$

$$Z_t = jX_t$$

أيضاً دع $N_p = N_t$ لكل المراحل، فإن الدائرة المكافئة لمحول الثلاث مراحل ستعطى كما في الشكل 2.11.



الشكل 2.11: الدائرة المكافئة لمحول ثلاث مراحل

الشكل 2.11 يمكن أن يخضع لمزيد من التبسيط إلى دائرة مبسطة جداً كما هو موضح في الشكل 2.12 مفاعلة دائرة القصر X_{res} short circuit reactance الناتجة يتم الحصول عليها من شرط أن مقنن القدرة للدائرتين هو نفسه. وهنا تبين التيارات مقابلة لجانب الجهد العالي.

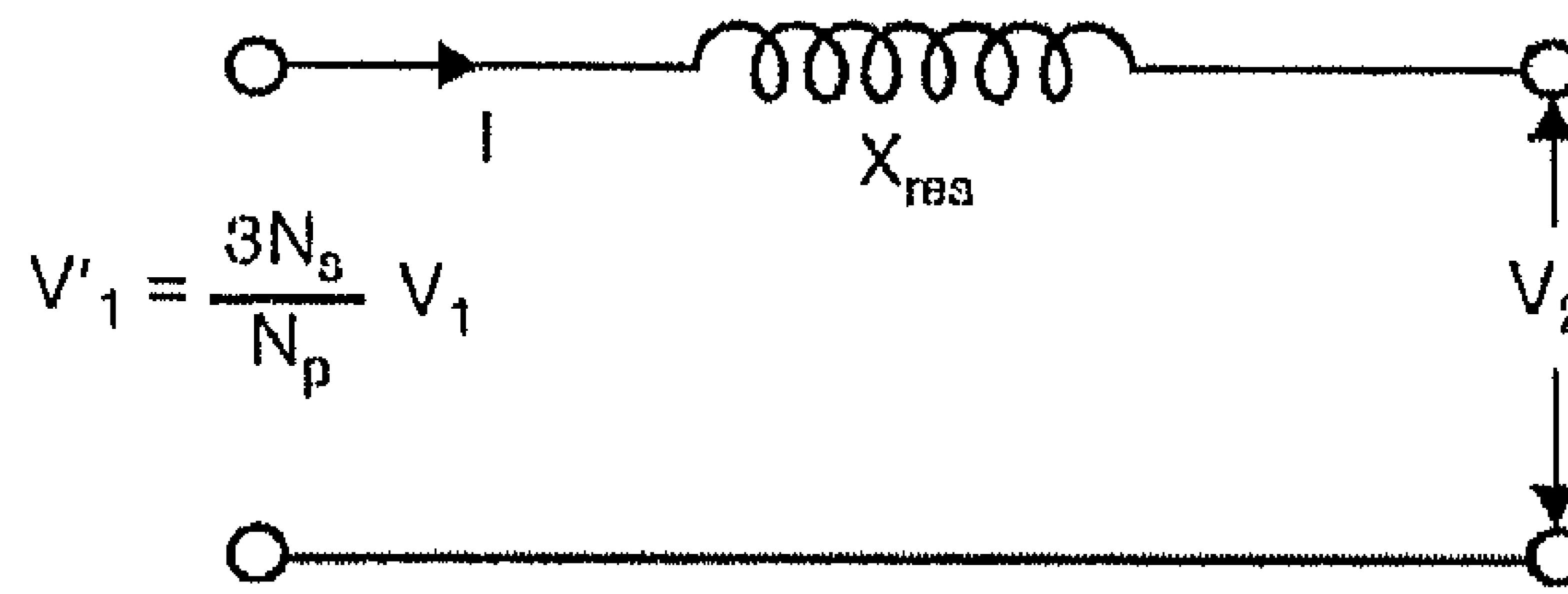
$$I^2 X_{res} = (3I)^2 X_p + (2I)^2 X_p + I^2 X_p + I^2 X_s + I^2 X_s$$
$$+ I^2 X_s + (2I)^2 X_t + I^2 X_t$$

$$X_{res} = 14X_p + 3X_s + 5X_t \qquad (20.2)$$

بدلاً من $3(X_p + X_s + X_t)$ كما يمكن أن يتوقع. المعادلة (2.20) يمكن تعميمها لمحول n مرحلة كالتالي:

$$X_{res} = \sum_{i=1}^{n}\left[(n-i+1)^2 X_{pi} + X_{si} + (i-1)^2 X_{ti}\right]$$

حيث X_{pi} ، X_{si} ، X_{ti} هي مفاعلات دائرة القصر للفات الابتدائية، الثانوية، الإضافية للمحول ith.



الشكل 2.12: دائرة مكافئة مبسطة

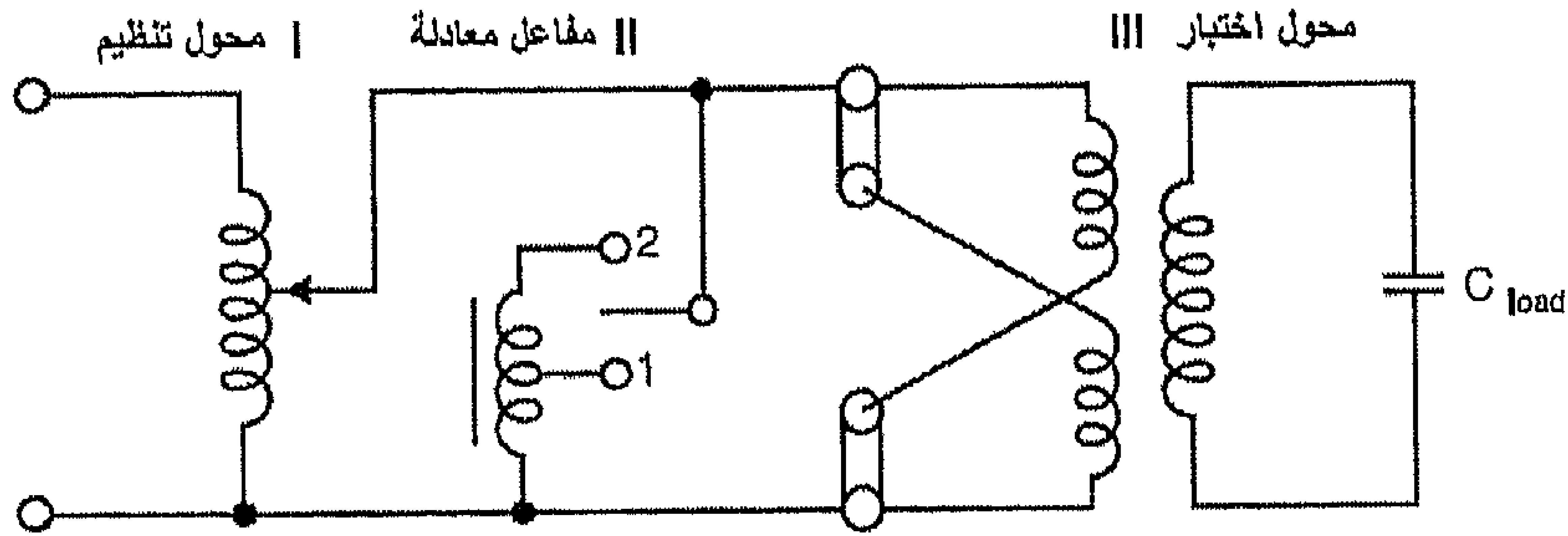
ولقد لوحظ أن معاوقة المحول المرحلتين هي حوالي من (4–3) مرة مثل معاوقة المحول وحدة واحدة ومعاوقة الثلاث مراحل هي من (9–8) مرة مثل معاوقة المحول وحدة واحدة. وبالتالي ليكون لدينا معاوقة منخفضة لمحول تعاقبي، من المرغوب فيه أن تكون معاوقة الوحدات المنفصلة صغير ما أمكن.

٢-٥-٢ معادلة [تعويض] قدرة المُفَاعلة **Reactive Power Compensation**

كما سبق الذكر، فإن محولات الاختبار تستخدم لاختبار عزل المعدات الكهربية المختلفة. وهذا يعني أن الحمل الموصل لهذه المحولات يكون عالي السعوية highly capacitive. لذلك، إذا أتيح جهد مقنن عند أطراف خرج محول الاختبار ووصلت قطعة الاختبار [حمل سعوي] عبر أطرافه، فإن الجهد عبر الحمل يصبح أعلى من الجهد المقنن حيث يسحب الحمل تيار متقدم. ولذلك فمن الضروري لتنظيم جهد الدخل إلى محول الاختبار حتى يبقى الجهد عبر الحمل – وهو متغير ويعتمد على قطعة الاختبار– مساوياً للجهد المقنن.

وهناك إمكانية أخرى وهي أنه يجب توصيل ملف حث متغير inductor عبر المصدر، كما هو مبين في الشكل 2.13، حتى تُمتص قدرة المفاعلة الناتجة من الحمل بواسطة ملف الحث

وبذلك يبقى الجهد عبر محول الاختبار داخل الحدود. ويجب ملاحظة أن محول الاختبار يجب أن يكون قادراً على إمداد أقصى قيمة لتيار الحمل المصمم لها على الإطلاق عند كل الجهود المتوسطة شاملة الجهد المقنن.

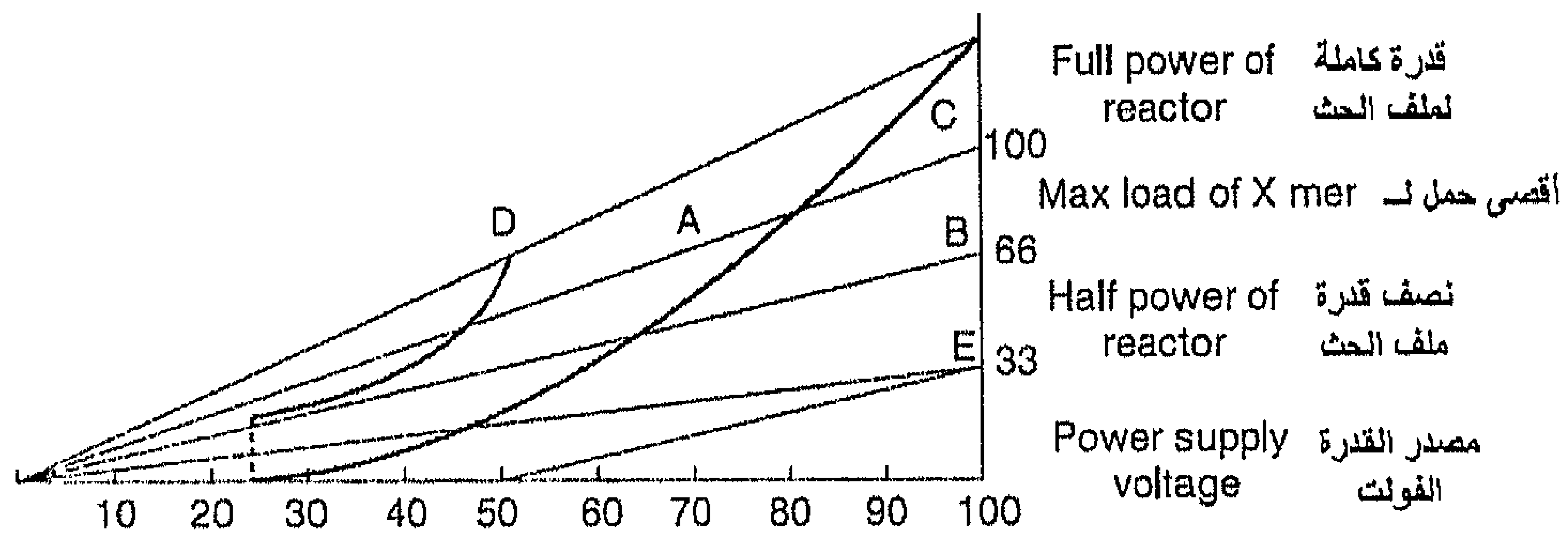


الشكل 2.13: المبدأ الأساسي لمعادلة قدرة المفاعلة

ولذلك تكون خصائص القدرة–الفولت خط مستقيم كما هو مبين بالخط A في الشكل 2.14. قدرة المفاعلة المعوضة الممتصة بواسطة ملف الحث ذو قلب الهواء مبينة على القطع المكافئة parabolas B ، C ، D وهذه ستكون قطع مكافئة حيث قدرة المفاعلة هي V^2/X.
المنحنى B يقابل الشرط عندما يوصل ابتدائي المحول على التوازي ويوصل ملف الحث عند الوضع 1 في الشكل 2.13.

وبالمثل فإن المنحنى– C عندما يوصل ابتدائي المحول على التوازي وملف الحث عند الوضع 1.

وبالمثل فإن المنحنى– D عندما يوصل ابتدائي المحول على التوالي وملف الحث عند الوضع 2.



الشكل 2.14: معادلة [تعويض] قدرة المفاعلة

عندما يكون الابتدائي موصل على التوالي –لنفس جهد الإمداد– يصبح الجهد/لفة من الابتدائي نصف قيمته عندما يوصل توازي –ولذلك– يصبح الجهد الثانوي نصف الجهد المقنن وبالتالي يبدأ المنحنى عند 50% من الجهد المقنن. قدرة منظم الجهد تكون متناسبة مع جهد الإمداد –ولذلك– يمثل بخط E في الشكل 2.14 والقدرة القصوى عند الجهد المقنن تكون 33.3% من أقصى مطالب قدرة للمحول. كل شروط التشغيل الممكنة لمحول الاختبار تقع داخل المساحة المثلثية المحاطة بالخط A، المحور السيني وخط الجهد المقنن 100% . وهذه المساحة قد قُسمت إلى أجزاء مختلفة، لذلك فإن قدرة الإمداد المسموحة [وهي هنا 33% من أقصى حمل للمحول] لا يتم تعديها أبداً. قيمة أعلى جهد تؤخذ دائماً لتقدير ترتيبات التعويض. وحيث إن معاوقة محول الاختبار تكون عادة كبيرة [حوالي %(25–20)]، فإن المدى تحت 25% من الجهد المقنن لا يؤخذ في الاعتبار.

واضح من الاعتبارات السابقة أن تصميم ملف حث التعويض يعتمد على الآتي:

١. سعة وجهد تشغيل عينة الاختبار.

٢. مقنن القدرة للمنظم المتاح.

٣. إمكانية التوصيلات المختلفة للفات محول الاختبار.

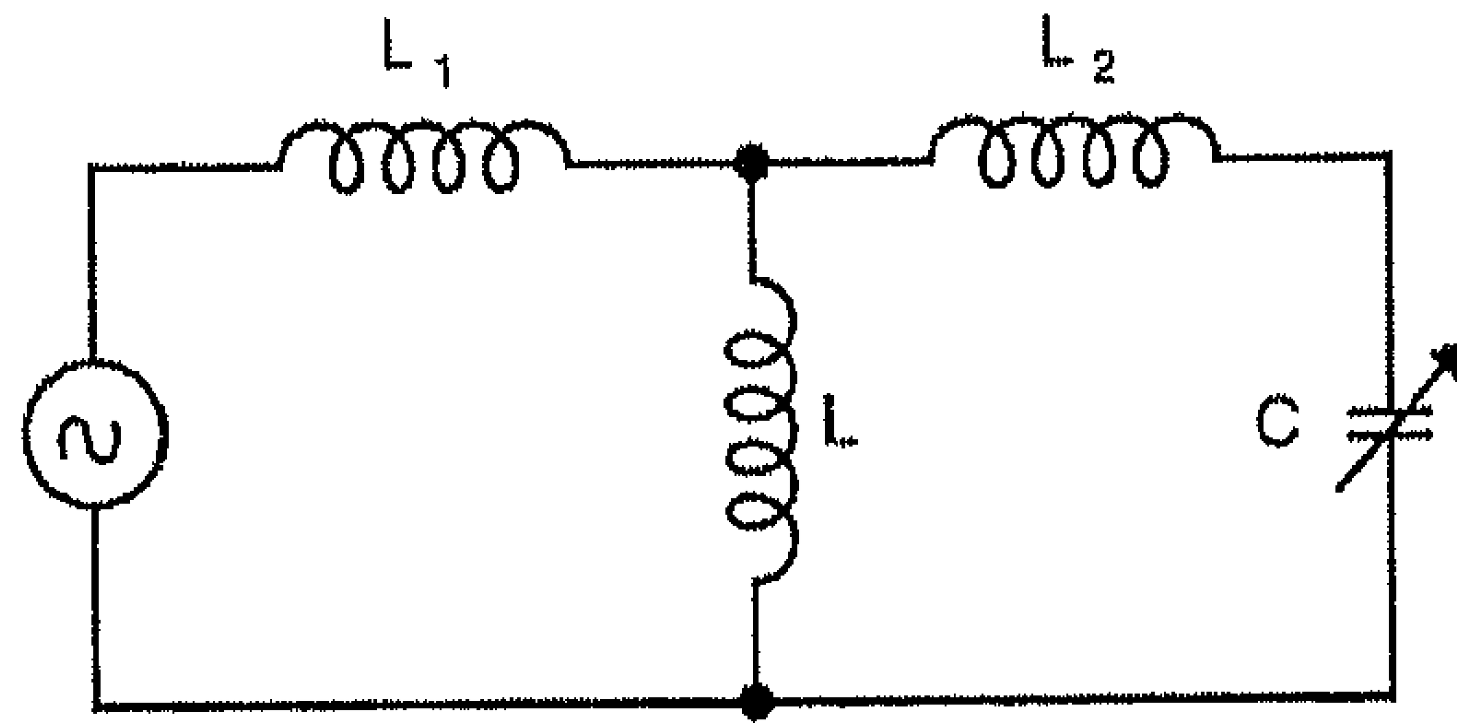
٤. مقنن قدرة محول الاختبار.

ولكي يحقق معمل الاختبار كل المطالب المختلفة، فإن كل حالة خاصة يجب أن تُبحث ويصمم ملف الحث المناسب لتعويض قدرة المفاعلة.

في المحولات متعددة المراحل مع خرج قدرة كبير يكون مطلوب التزود بتعويض قدرة مفاعلة عند كل مرحلة حتى يتحسن استقرار الجهد لمحول الاختبار بشكل كبير.

٢-٦ دائرة التوالي الرنانة Series Resonant Circuit

الدائرة المكافئة لمحول اختبار مرحلة واحدة مع حمله السعوي موضحة في الشكل 2.15. وهنا يمثل L_1 محاثة inductance منظم الجهد وابتدائي المحول، L محاثة الإثارة للمحول، L_2 محاثة ثانوي المحول، C سعة الحمل. وعادة تكون المحاثة L كبيرة جداً بالمقارنة بـ L_1، L_2 وبالتالي فإن تأثير تفرعهما يمكن إهماله. وعادة تكون سعة الحمل متغيرة ويكون من الممكن لتحميل معين أن يحدث رنين في الدائرة فجأة وسيكون التيار محدود بمقاومة الدائرة والجهد عبر عينة الاختبار يرتفع إلى (40–20) ضعف القيمة المطلوبة.

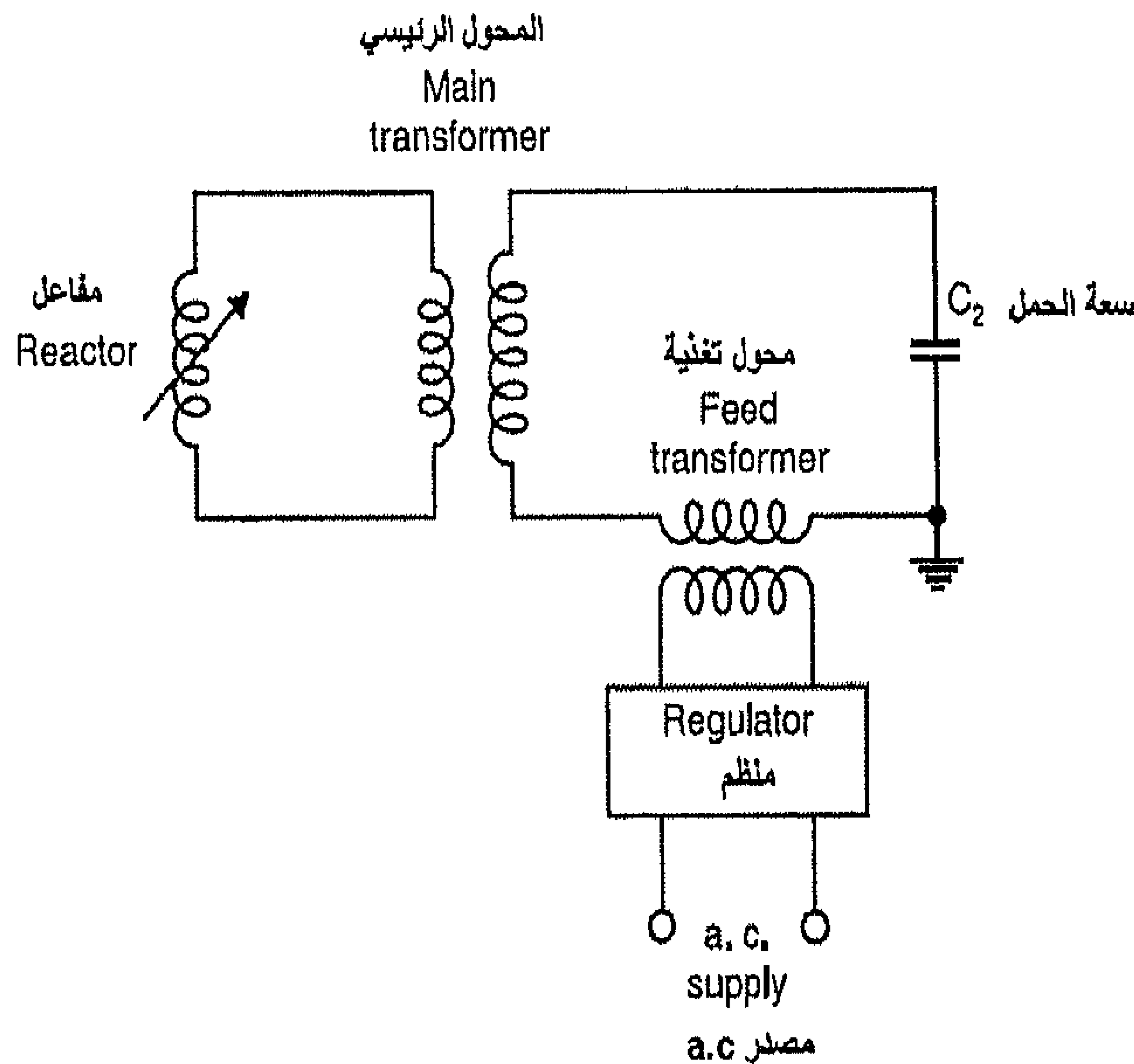


الشكل 2.15: دائرة مكافئة لمحول محمل بمرحلة واحدة

وبالمثل فإن تواجد توافقيات بسبب تشبع القلب الحديد للمحول يمكن أيضاً أن يؤدي إلى رنين. ترددات التوافقية الثالثة وجد أنها وخيمة العاقبة.

مع رنين التوالي، يكون الرنين متحكم فيه عند التردد الأساسي وبالتالي لا يحدث رنين غير مرغوب فيه.

تطور دائرة رنين التوالي لأغراض الاختبار لاقت ترحاباً كبيراً في صناعة الكابلات حيث تواجه مشكلة الرنين مع محول الاختبار أثناء اختبار الأطوال القصيرة من الكابلات.



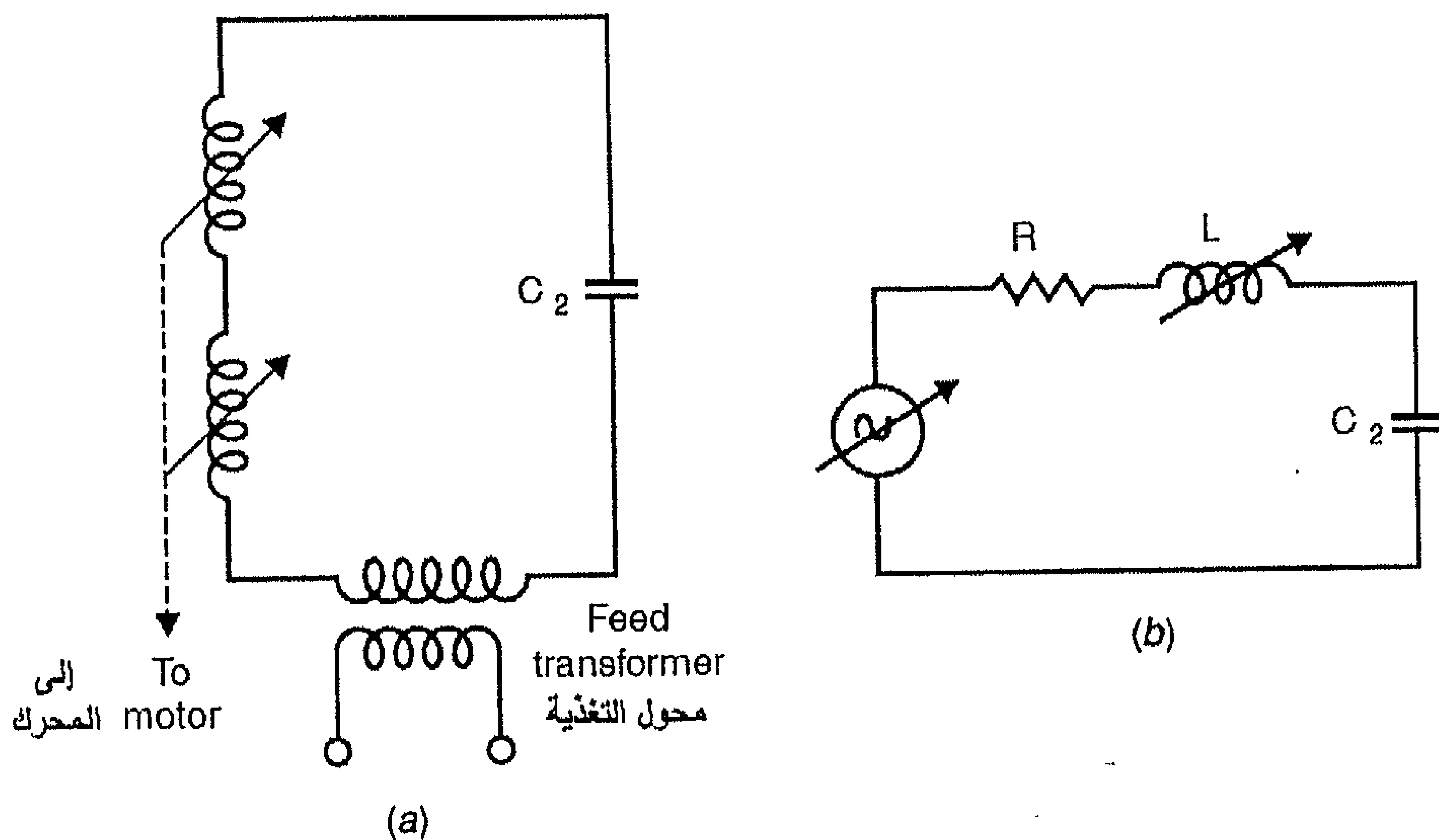
الشكل 2.16: دائرة رنين مكونة من محول مفرد/مفاعل توالي

في المراحل الابتدائية كان من الصعب تصنيع جهد عالي متغير باستمرار وملفات حث عالية القيمة لتستخدم في دائرة التوالي ولذلك، استخدمت طرق غير مباشرة لتحقيق هذا

الهدف. الشكل 2.16 يوضح مفاعل متغير باستمرار continuously variable reactor موصل الملف منخفض الجهد لمحول رافع الملف الثانوي له مقنن لجهد الاختبار الكامل. C_2 يمثل سعة الحمل.

إذا كانت N هي نسبة التحويل، L هي المحاثة على الجانب منخفض الجهد للمحول، فإنها ستتحول بقيمة N^2L على الجانب الثانوي للمحول [جانب الحمل]. ولضبط معين للمفاعل، فإن المفاعلة الحثية يمكن أن تساوي المفاعلة السعوية للدائرة، وبالتالي سيحدث الرنين. وهكذا تصبح مطالب قدرة المفاعلة للمصدر صفر وعليه أن يمد مفقودات الدائرة فقط. ومع ذلك، فإن على المحول أن يحمل تيار الحمل الكامل على جانب الجهد العالي، وهذا هو عيب للطريقة. وتصمم ملفات الحث inductors لعوامل جودة عالية $Q = \omega L/R$. ولذلك، يحقن محول التغذية مفقودات الدائرة فقط.

وأصبح من الممكن الآن تصنيع مفاعلات متغيرة باستمرار عالية الجهد 300 kV لكل وحدة باستخدام تقنية جديدة مع قلب حديد مشقوق. وبذلك، يمكن حذف محول الاختبار الرافع كما هو مبين في الشكل 2.17. محاثة ملفات الحث هذه يمكن أن تتغير عبر مدى واسع اعتماداً على سعة الحمل لإنتاج الرنين.



الشكل 2.17: (a) دائرة رنين توالي بمفاعل h.t متغير؛ (b) الدائرة المكافئة لـ (a)

الشكل 2.17(b) يمثل دائرة مكافئة لدائرة رنين توالي. وهنا R تكون عادة ذات قيمة

منخفضة. وبعد تحقيق شرط الرنين، يمكن زيادة جهد الخرج بزيادة جهد الدخل. وتقنن محولات التغذية من أجل مقننات التيار الاسمي للمفاعل. تحت الرنين، سيكون جهد الخرج هو:

$$V_0 = \frac{V}{R}\frac{1}{\omega C_2}$$

حيث V= جهد الإمداد.

حيث عند الرنين يكون:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_2}$$

لذلك:

$$V_0 = \frac{V}{R}\omega L = V\,Q$$

حيث Q= معامل جودة ملف الحث والذي يتغير عادة بين 40، 80 .

وهذا يعني أنه مع $Q = 40$ يكون جهد الخرج 40 مرة مثل جهد الإمداد. وهذا يعني أيضاً أن مطالب القدرة الفعالة لسعة الحمل بالـ kVA تكون 40 مرة مثل القدرة التي تعطى بواسطة محول التغذية بالـ kW. وهذا يؤدي إلى مقنن قدرة صغير نسبياً لمحول التغذية.

مميزات دائرة رنين التوالي Advantages of Series Resonance Circuit

١. مطالب القدرة بالـ kW لدائرة التغذية هي kVA/Q حيث kVA هي مطالب القدرة الردية reactive power للحمل، Q هي معامل الجودة للمفاعل المتغير وعادة يكون أكبر من 40 وبالتالي فإن المطالب تكون صغيرة جداً.

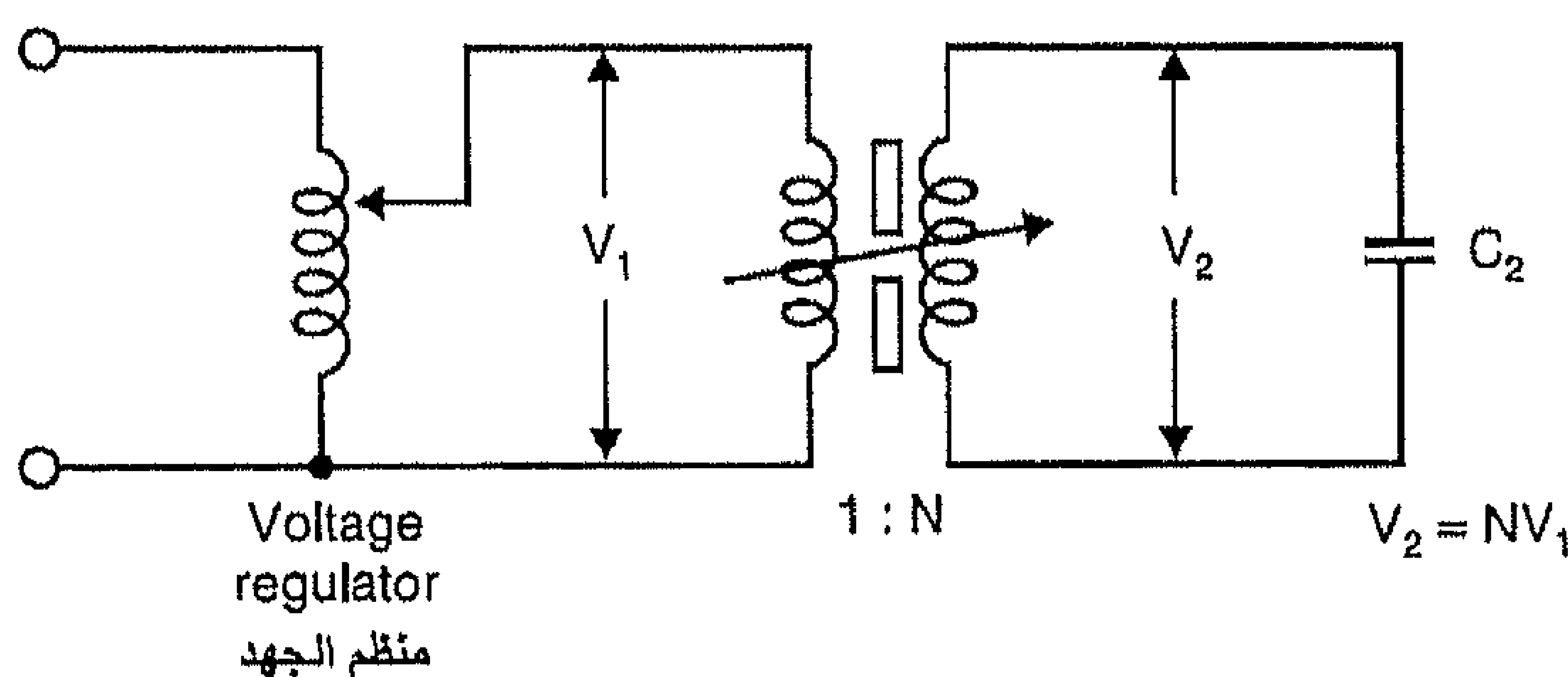
٢. دائرة رنين التوالي تخمد [تمنع] التوافقيات والتداخل إلى حد كبير. الموجة الجيبية القريبة تساعد التفريغ الجزئي الدقيق للقياسات وتكون مرغوبة لقياس زاوية الفقد وسعة المواد العازلة باستخدام قنطرة سشيرنج.

٣. في حالة الشرارة أو انهيار عينة الاختبار أثناء إجراء الاختبار على جانب الجهد العالي، تفض موالفة دائرة الرنين ويهبط جهد الاختبار في الحال. تيار دائرة القصر يكون محدوداً بمفاعلة reactance المفاعل المتغير. وقد ثبت أنه يكون ذات قيمة كبيرة حيث إن الجزء الضعيف من عزل العينة لا يُدمر. في الحقيقة، حيث إن شرارة القوس لها طاقة صغيرة جداً، فمن السهل ملاحظة أين يحدث الشرر بالضبط بواسطة تأخير تعتيق المصدر والسماح بمعاودة الشرر.

٤. لا تحتاج لمفاعلات تعويض منفصلة [كما هو لدينا في حالة محولات الاختبار]. وهذا يؤدي إلى وزن كلي أقل.

٥. عند اختبار مفتاح SF_6 ، فإن الانهيارات المتعددة لا تؤدي إلى عابرات transients عالية. وبالتالي، يكون غير مطلوب حماية خاصة ضد العابرات.

٦. توصيلات التوالي أو التوازي لعدة وحدات ليست مشكلة إطلاقاً. فأي عدد من الوحدات يمكن أن يوصل على التوالي بدون القلق من مشكلة المعاوقة المرتبطة بشدة بمحول الاختبار التعاقبي. في حالة عينة اختبار تتطلب تيار كبير للاختبار، يمكن توصيل الوحدات على التوازي بدون أي مشكلة.



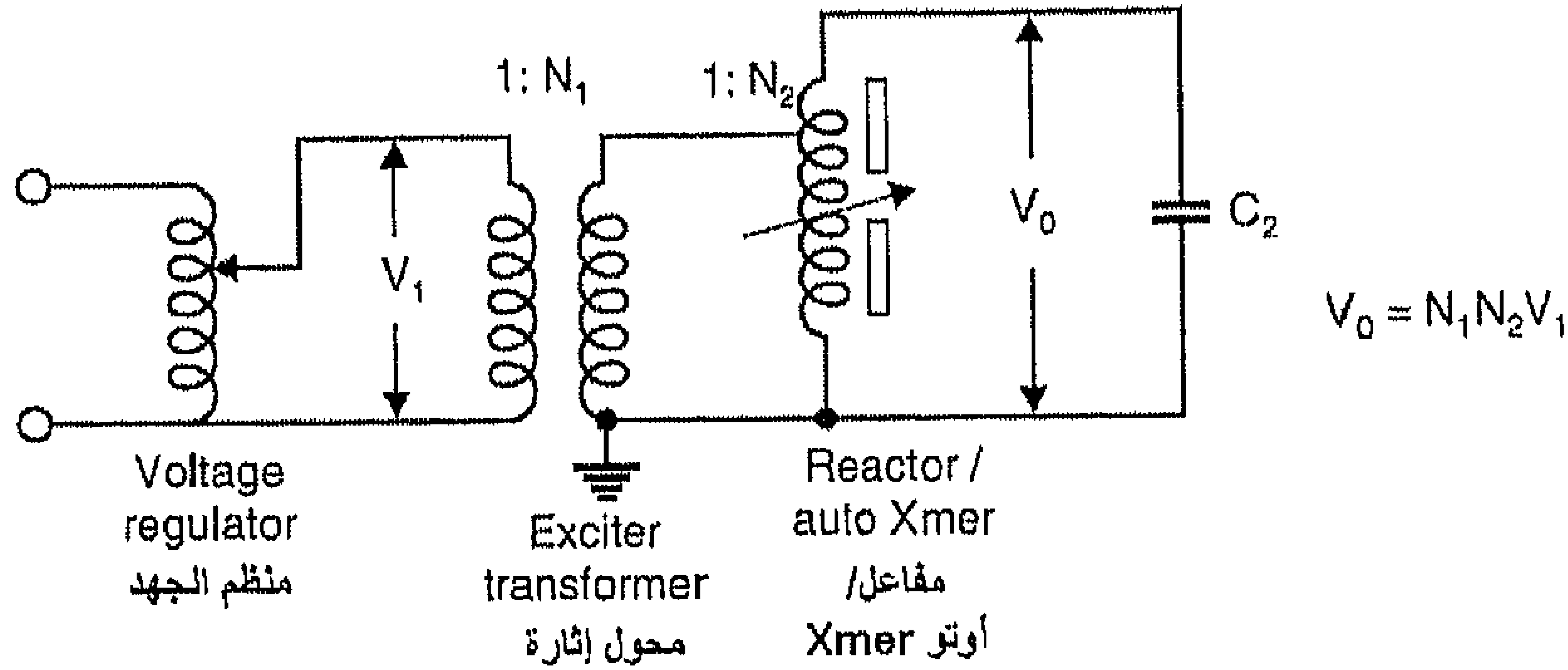
الشكل 2.18: نظام الرنين المتوازي

الشكل 2.18 يبين مخطط لأنظمة رنين متوازية نموذجية. وهنا يكون المفاعل المتغير مُدمج في محول الجهد العالي بإدخال ثغرة هوائية متغيرة في قلب المحول. مع هذا التوصيل، فغن التغيرات في سعة الحمل والمفقودات تسبب تغير في تيار الدخل فقط. ويبقى جهد الخرج ثابتاً عملياً. داخل الوحدات ذات التصميم مفرد المرحلة، فإن طريقة الرنين المتوازي تقدم أداء اختبار أمثل.

في محاولة لأخذ مميزات كل من طريقتي التوصيل، أي أنظمة الرنين المتوالي والمتوازي فقد تم محاولة نظام ثالث يستخدم توصيلات توال توازي. وهو أساساً تعديل لنظام رنين التوالي ليعطي معظم خصائص نظام التوازي. الشكل 2.19 يبين مخطط لطريقة التوالي التوازي نموذجية.

وهنا يتحقق جهد الخرج بواسطة فعل محول ذاتي auto transformer والتعويض المتوازي يتحقق بواسطة توصيل المفاعل reactor. ولوحظ أنه أثناء عملية الموالفة لمعظم الأحمال، توجد

فتحة ثغرة معينة ستؤدي إلى نظام الاختيار الموصل توازي يذهب إلى الجهد الزائد غير المتحكم فيه لعينة الاختبار وإذا سمح لمجموعة الاختبار بالتشغيل لزمن طويل، سينتج تسخين زائد وتدمير للمفاعل.



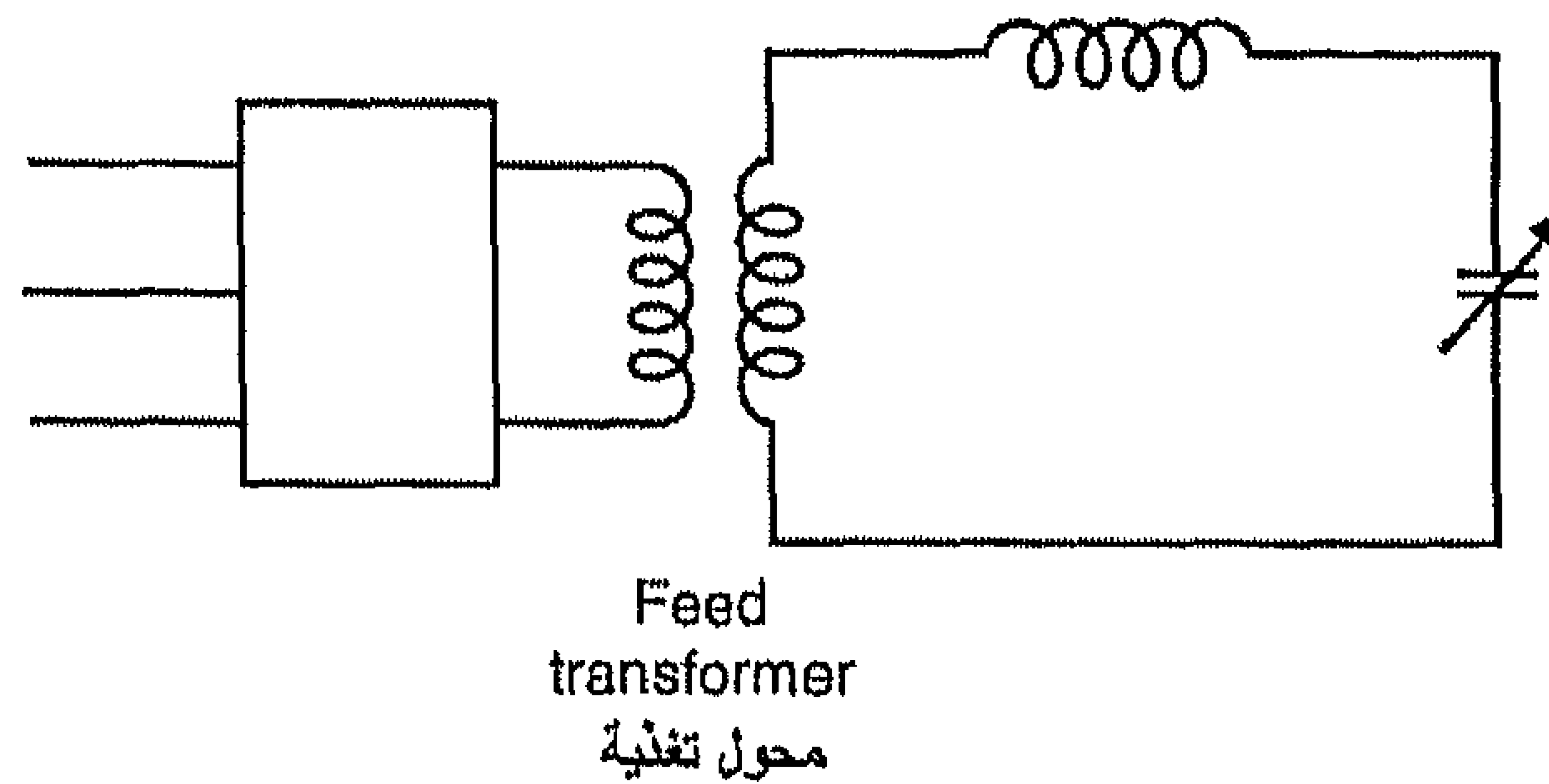
الشكل 2.19: نظام رنين توالي–توازي

ولوحظ أيضاً عملياً، أن التوازن الكامل للأمبير–لفة يحدث عندما يشغل النظام تحت شرط الرنين المتوازي. تحت كل أنواع الضبط الأخرى للمفاعل المتغير، سيدفع عدم التوازن في الأمبير–لفة بتسرب كبير إلى الخزان المعدني المحيط ومنشأ التثبيت والذي سيسبب تيارات كبيرة تمر بالدائرة تؤدي إلى بقع ساخنة ستؤثر بالسلب على متانة العزل الكهربي للزيت في الخزان.

ومن وجهة نظر الاعتبارات السابقة، فقد أُوصيً بعدم الخوض في أسلوب رنين التوالي–توازي للتشغيل لأغراض الاختبار. وإذا كان مطلوب نظام مرحلة واحدة حتى 300 kV باستخدام جهد اختبار الرنين، يجب تبني نظام الرنين المتوازي. ولجهد اختبار يتعدى 300 kV يوصى بشدة بطريقة رنين التوالي.

الوزن النوعي لمحول الاختبار التعاقبي يتغير بين kg/kVA (10–20) بينما لدائرة رنين التوالي مع مفاعلات جهد عالي متغيرة فإنه يقع بين kg/kVA (3–6).

مع تطور المغيِّر converter استاتيكي التردد أصبح من الممكن الآن الحصول على مزيد من تخفيض الوزن النوعي. ولكي نحصل على رنين في الدائرة يمكن استخدام خانق ذو قيمة ثابتة وعند تغير سعة الحمل فإن تردد المصدر يجب أن يتغير. الشكل 2.20 يبين مخطط لدائرة رنين توالي مع مصدر متغير التردد.



الشكل 2.20: مخطط لدائرة رنين توالي مع مصدر متغير التردد

مغير التردد frequency convertor يقوم بإمداد مفقودات دائرة الاختبار فقط والتي تكون عادة في حدود 3% من قدرة المفاعلة لمكثف الحمل حيث إن الخانق يمكن أن يصمم لعامل جودة عالي جداً.

وهناك تحذير هام جداً متصل باختبار عنية الاختبار ذات السعة الكبيرة. فمع مفاعلة ثابتة، سيكون تردد الرنين صغيراً مقارنة بالتردد العادي. وإذا أخذنا الجهد المؤثر كالجهد العادي فإن قلب core محول التغذية سيتشبع حيث V/f حينئذ ستكون كبيرة والفيض في القلب سيكون كبيراً. ولذلك يجب التأثير بجهد مناسب لتجنب هذا الموقف.

مع دوائر مغير التردد الاستاتيكي أصبح الوزن النوعي منخفضاً ووصل إلى 0.5 kg/kVA.

ويجب ملاحظة أنه بينما أنظمة رنين التوالي شائعة لاختبار الكابلات والأحمال السعوية الخالية من المفقودات جداً، إلا أن محولات التعاقب تكون أكثر انتشاراً في معامل الجهد العالي لاختبار المعدات في مدى MV وأيضاً للأحمال العالية نسبياً.

أسئلة

٢–١ اشرح وقارن أداء مقوِّم نصف الموجة ودوائر مضاعفة الجهد لتوليد جهود d.c عالية.

٢–٢ عرف جهد التموج.

٢–٣ بين أن جهد التموج في دائرة مقوِّم يعتمد على تيار الحمل وبارامترات الدائرة.

٢–٤ اشرح مع الرسم دائرة مضاعف الجهد لـ"كوكروفت–والتون".

٢–٥ اشرح تشغيل مضاعف جهد كوكروفت–والتون عندما تكون الدائرة:

(أ) غير محملة. (ب) محملة.

٢–٦ اشتق علاقة لجهد التموج لدائرة مضاعف كوكروفت–والتون متعددة المراحل.

٢–٧ اشتق علاقة لجهد الخرج تحت شرط الحمل. ثم استنتج شرط العدد الأمثل من المراحل إذا كان مطلوباً أقصى قيمة من جهد الخرج.

٢–٨ اشرح مع الرسم مبدأ تشغيل وتطبيق المقوِّم التعاقبي المتماثل.

٢–٩ اشرح مع الرسم مبدأ تشغيل المولد الكهروستاتيكي.

٢–١٠ ما المحول التعاقبي؟ اشرح لماذا يتم التعاقب. أو صف محول تعاقبي ثلاث مراحل مع الرسم.

٢–١١ ارسم الدائرة المكافئة لمحول تعاقبي ثلاث مراحل. واذكر علاقة تبين معاوقة دائرة القصر للمحول.

٢–١٢ اشرح المبدأ الأساسي لتعويض قدرة المفاعلة في اختبار HVAC للمواد العازلة.

٢–١٣ اشرح المبدأ الأساسي للآتي:

(أ) دوائر رنين التوالي. (ب) دوائر رنين التوازي لتوليد HVAC.

وقارن أدائهم.

٢–١٤ اشرح دائرة رنين التوالي–توازي. اذكر العيوب والميزات.



توليد الجهود والتيارات الدافعة

Generation of Impulse Voltages & Currents

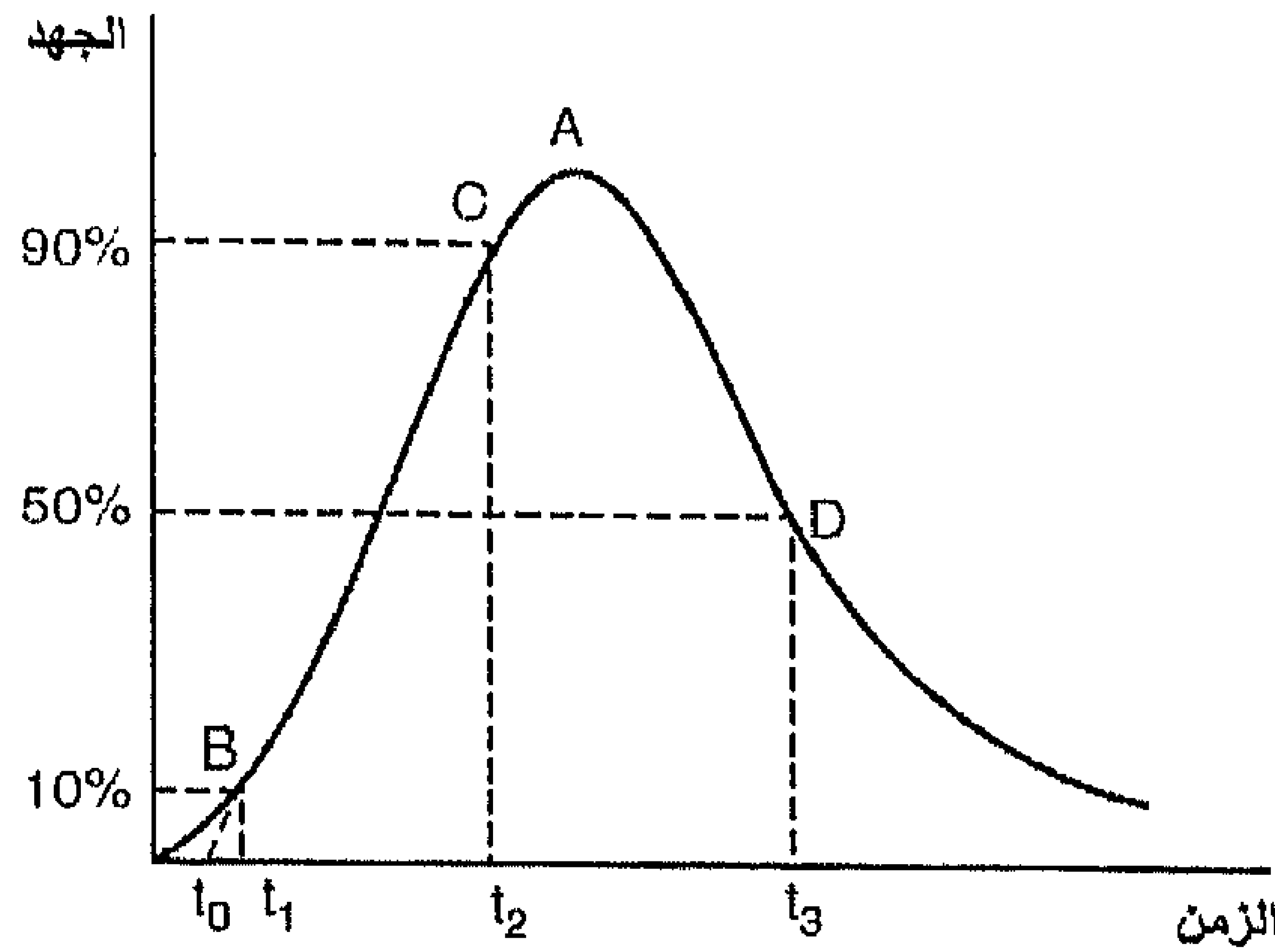
٣-١ تعريفات Definitions

الجهد الدفعي Impulse Voltage

الجهد الدفعي [النبضي] هو جهد وحيد الاتجاه والذي –بدون تذبذبات محسوسة– يرتفع بسرعة إلى أقصى قيمة ويهبط بسرعة أكبر أو أقل إلى الصفر [الشكل 3.1]. وتسمى أقصى قيمة بـ"قيمة الذروة" peak value للدَفْعَة، ويُميز الجهد الدفعي بهذه القيمة. ومسموح بذبذبات صغيرة، بشرط أن تكون سعتها أقل من 5% من قيمة الذروة للجهد الدفعي. في حالة ذبذبات في شكل موجة، يمكن اعتبار منحنى متوسط.

إذا تولد الجهد الدفعي بدون التسبب في شرر أو ثقب، فإنه يسمى "جهد دفعي كامل"، وإذا حدث الشرر أو الثقب وتسبب في هبوط مفاجئ للجهد الدفعي، فإنه يسمى "جهد دفعي مشطور" chopped impulse voltage. ويتميز الجهد الدفعي الكامل بقيمة ذروته وفترتيه الزمنيتين، الفترة الزمنية لجبهة الموجة وذيل الموجة يعرفان بأسفل:

زمن جبهة الموجة wave front time لموجة دفعية هو الزمن المأخوذ بالموجة لتصل إلى أقصى قيمة لها بدءاً من قيمة الصفرز وعادة يكون من الصعب التعرف على نقط البدء والذروة للموجة –ولذلك– يُحدد زمن بـ $1.25(t_2-t_1)$ حيث t_2 هو زمن وصول الموجة إلى 90% من قيمة الذروة، t_1 هو زمن الوصول إلى 10% من قيمة الذروة. وحيث إن (t_2-t_1) تمثل حوالي 80% من زمن جبهة الموجة، فإنها تُضرب في 1.25 لتعطي زمن جبهة الموجة الإجمالي. نقطة تقاطع الخط CB مع محور الزمن يرجع إليها كنقطة البدء الاسمية للموجة t_0.



الشكل 3.1: موجة دفعية كاملة

ويقاس زمن ذيل الموجة الاسمي بين نقطة البدء الاسمية t_0 والنقطة التي على ذيل الموجة حيث يكون الجهد 50% من قيمة الذروة أي أن زمن ذيل الموجة يعبر عنه كـ $(t_3 - t_0)$.

شدة الانحدار الاسمية لجبهة الموجة هي معدل الارتفاع المتوسط للجهد بين النقط التي على جبهة الموجة حيث الجهد يكون 10%، 90% من قيمة الذروة على التوالي.

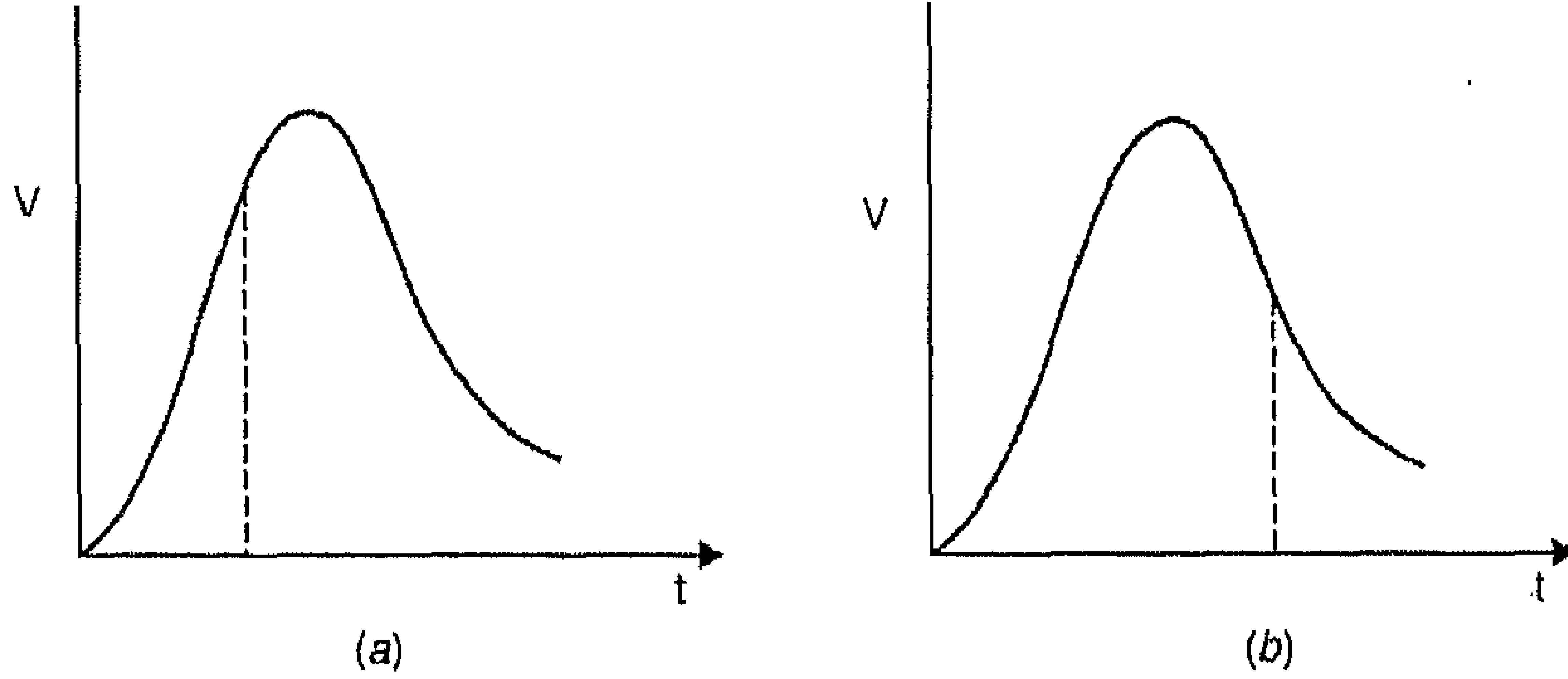
شكل الموجة القياسي المحدد في BSS، ISS هو موجة .1/50 μ sec أي جبهة موجة ذو .1 μ sec وذيل موجة .50 μ sec . ويُسمح بسماحية ليست أكبر من 50%± لدوام جبهة الموجة، 20% على زمن نصف القيمة على ذيل الموجة. وتحدد الموجة كاملة كـ .1/50 μ sec، 100 kV حيث 100 kV هي قيمة ذروة الموجة.

شكل الموجة الموصى به بواسطة الجمعية القياسية الأمريكية هو .1.5/40 μ sec، مع تغيرات مسموحة .0.5 μ sec على جبهة الموجة، .10 μ sec± على ذيل الموجة. ويؤخذ زمن جبهة الموجة كـ 1.67 مرة قدر الزمن المأخوذ بالموجة لترتفع من 30% إلى 90% من قيمة ذروتها ويحسب زمن ذيل الموجة كما في BSS أو ISS أي أنه يعطى كـ $(t_3 - t_0)$ [الشكل 3.1].

الموجة المشطورة Chopped Wave

إذا أثر جهد دفعي على قطعة من العزل وإذا حدث شرر أو ثقب سبب هبوط مفاجئ للجهد الدفعي، فإنه يسمى "جهد دفعي مشطور" chopped impulse voltage. وإذا حدث الشطر على الجزء الأمامي [الجبهة] للموجة، فإنه يعرف بـ"الموجة المشطورة الأمامية"

[الشكل (3.2(a] وهي تعرف ببساطة بـ"الموجة المشطورة" –الشكل (3.2(b– مرة ثانية، إذا حدث الشطر في الأمام، فإنها تحدد بواسطة قيمة الذروة المقابلة للقيمة المشطورة وانحدارها الاسمي هو معل ارتفاع الجهد المقاس بين النقط %10، %90 من الجهد على الترتيب عند لحظة الشطر. ومع ذلك، فإن الموجة المشطورة على الذيل تُحدد على خطوط موجة كاملة.



الشكل 3.2: موجات مشطورة. (a) موجة مشطورة أمامية؛ (b) موجة مشطورة

جهد الشرر الدفعي Impulse Flash Over Voltage

عندما يؤثر جهد دفعي على وسط عازل ذو سمك معينن يمكن أن يحدث شرر أو لا يحدث. فإذا كان إجمالي عدد مرات التأثير بجهود دفعية 10 مرات وحدث في 5 مرات منهم شرر فإن احتمال الشرر مع هذا الجهد الذروي للجهد الدفعي تكون %50، لذلك، فإن %50 جهد شرر دفعي تكون قيمة الذروة لجهد الشرر الدفعي الذي سبب شرر العينة تحت الاختبار لحوالي نصف عدد تأثيرات الدَفْعَات. ومع ذلك، يجب ملاحظة أن الشرر يحدث عند لحظة تالية للحصول على القيمة الذروية. والشرر يعتمد أيضاً على القطبية، فترة دوام جبهة الموجة وذيل الموجة للجهود الدفعية المؤثرة.

وإذا حدث الشرر أكثر من %50 من عدد التأثيرات، فإنه يُعرِّف ب"جهد شرر دفعي زيادة عن %50". جهد الشرر الدفعي لشرر على جبهة الموجة هي قيمة الجهد الدفعي عند لحظة الشرر على جبهة الموجة.

جهد الثقب الدفعي Impulse Puncture Voltage

وهو قيمة ذروة الجهد الدفعي الذي يسبب ثقب المادة عند حدوث الثقب على ذيل الموجة وهو قيمة الجهد عند لحظة الثقب عند حدوث الثقب على جبهة الموجة.

النسبة الدفعية للشرر **Impulse Ratio for Flashover**

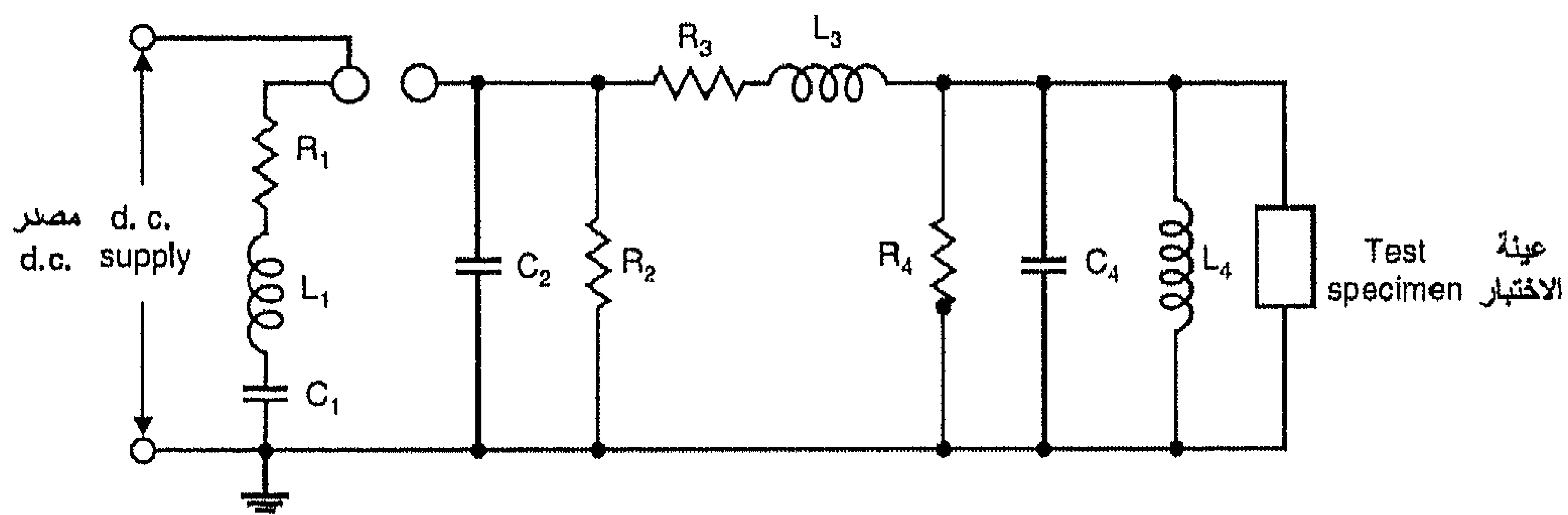
وهو نسبة جهد الشرر الدفعي إلى قيمة ذروة جهد شرر تردد القدرة. ونسبة الدفع ليست ثابتة لأي هدف خاص، ولكنها تعتمد على الشكل وقطبية الجهد الدفعي، الخواص التي يجب أن تُحدد عندما يطلب نسب دفعية.

النسبة الدفعية للثقب **Impulse Ratio for Puncture**

وهو نسبة جهد الثقب الدفعي إلى قيمة ذروة جهد ثقب تردد القدرة.

٣-٢ دوائر المولد الدفعي **Impulse Generator Circuits**

الشكل 3.3 يمثل دائرة مكافئة مضبوطة لمولد دفعي مرحلة واحدة مع حمل نموذجي. C_1 هي سعة المولد مشحون من مصدر d.c حتى جهد مناسب يسبب تفريغ خلال ثغرة كروية. السعة C_1 يمكن أن تتكون من سعة منفردة، وفي هذه الحالة يعرف المولد بـ"مولد مرحلة واحدة" أو بدلاً من ذلك إذا كانت C_1 هي السعة الإجمالية لمجموعة من المكثفات تشحن على التوازي ثم تفرغ على التوالي، فإنه عندئذ يعرف كـ"مولد متعدد المراحل".



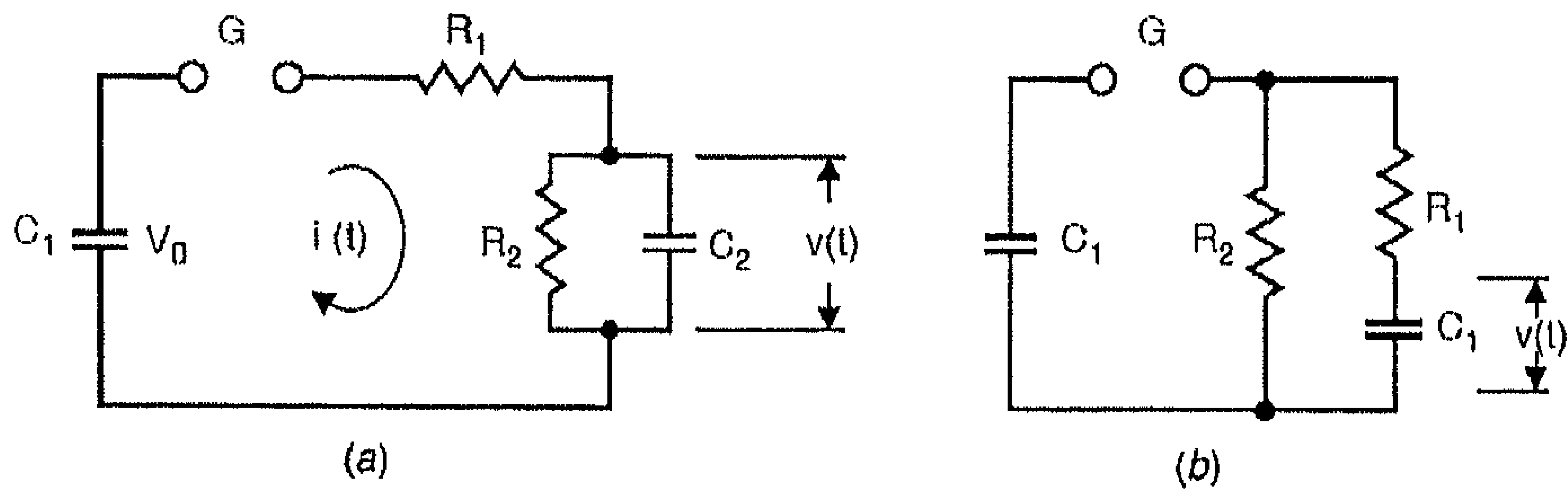
الشكل 3.3: دائرة مكافئة لمولد دفعي مرحلة واحدة مع حمل نموذجي

L_1 هي محاثة المولد والأطراف التي توصل المولد لدائرة التفريغ وعادة تحفظ صغير كلما أمكن. وتتكون المقاومة R_1 من مقاومة التوالي الأصلية للمكثفات والأطراف وغالباً تشمل مقاومات إضافية مجمعة مدخلة داخل المولد لأغراض الخمد وللتحكم في خرج شكل الموجة. L_3 ، R_3 هي العناصر الخارجية والتي يمكن أن توصل عند أطراف المولد للتحكم في شكل الموجة. R_2 ، R_4 تتحكم في فترة دوام الموجة. ومع ذلك، R_4 تخدم أيضاً كمقسم جهد عند استخدام CRO لأغراض القياس. C_2 ، C_4 تمثل السعات مع أرض المعدات عالية الجهد والأطراف. C_4

يشمل أيضاً سعة قطعة الاختبار وأي حمل آخر مطلوب لإنتاج شكل الموجة المطلوب. L_4 يمثل محاثة عينة الاختبار ويمكن أن يؤثر أيضاً على شكل الموجة.

عادة ولأسباب عملية، يؤرض طرف واحد من المولد الدفعي. ويمكن تغيير قطبية جهد خرج بتغيير قطبية جهد الشحن d.c.

لتقدير مكونات الدائرة الدفعية المختلفة، فإن التحليل باستخدام الدائرة المكافئة للشكل 3.3 يكون صارماً ومعقداً. ولذلك مُوضح دائرتين مبسطتين ولكنها عملية أكثر من دوائر المولد الدفعي يتم استخدامها في الشكل (3.4(a، (3.4(b.



الشكل 3.4: دائرتان مكافئتان مبسطتان للمولد الدفعي

وتستخدم الدائرتان على نطاق واسع وتختلف فقط في موقع مقاومة تحكم ذيل الموجة R_2. فعندما تكون R_2 على جانب حمل R_1 [الشكل (3.4(a] فإن المقاومتين يشكلان مقسم جهد يخفض جهد الخرج. ولكن عندما تكون R_2 على جانب المولد لـ R_1 [الشكل (3.4(b] فإن الفقد الخاص لجهد الخرج يكون غائباً.

يشحن المكثف الدفعي C_1 من خلال مقاومة شحن [غير موضحة] إلى جهد d.c V_0 ثم يفرغ بواسطة شرارة الثغرة مع نبضة ذو قيمة مناسبة. ويظهر الجهد الدفعي المطلوب عبر سعة الحمل C_2. قيمة عناصر الدائرة تحدد شكل خرج الجهد الدفعي.

٣-٢ دائرة المولد الدفعي متعدد المراحل Multistage Impulse Generator Circuit

لكي نحصل على جهود دفعية أعلى وأعلى، فإن دائرة المرحلة الواحدة تكون غير مناسبة وذلك للأسباب التالية:

١. يصبح الحجم الفيزيائي لعناصر الدائرة كبيراً جداً.

٢. يكون مطلوب جهد شحن d.c عالي.

٣. كبت تفريغات الكورونا من التركيب والأطراف أثناء فترة الشحن يكون صعباً.

٤. تشغيل المفاتيح لجهود عالية جداً مع ثغرات شرر يكون صعباً.

في عام 1923 اقترح E. Marx دائرة مضاعف استخدمت للحصول على جهود دفعية مع قيمة ذروة أعلى ما يمكن لجهد شحن d.c معطى.

واعتماداً على جهد الشحن المتاح وجهد الخرج المطلوب يُشحن عدد من المكثفات الدفعية المتماثلة على التوازي ثم تفرغ على التوالي، وبذلك نحصل على جهد شحن إجمالي مضاعف يقابل عدد من المراحل. الشكل 3.5 يبين دائرة مولد دفعي ثلاث مراحل خاص بـ E. Marx يستخدم توصيلات دائرة 'b'. المكثفات الدفعية C_1 تشحن إلى جهد شحن V_0 من خلال مقاومات الشحن العالية R_c على التوازي. وعندما تنهار كل الثغرات G، فإن المكثفات C_1' تكون متصلة على التوالي ولذلك فإن C_2 يشحن من خلال توصيل التوالي لكل مقاومات جبهة الموجة R_1' وفي النهاية فإن كل C_1'، C_2 ستفرغ خلال المقاومات R_2'، R_1'. وعادة ما يكون $R_c \square R_2 \square R_1$.

الشكل 3.5: مولد دفعي ماركس 3-مراحل في توصيلات دائرة 'b'

في الشكل 3.5، مقاومات ذيل الموجة R_2' في كل مرحلة تكون موصلة على التوازي مع مجموعة التوالي R_1'، G، C_1' وبذلك نحصل على مولد دفعي من نوع الدائرة 'a'.

ولكي تعمل دائرة ماركس بتوافق يكون من الضروري ضبط المسافات بين ثغرات الكرة المختلفة بحيث الثغرة الأولى G_1 تكون أقل قليلاً من G_2 وهكذا. ومن الضروري أيضاً أن تكون محاور الثغرات G في نفس المستوى الرأسي حتى تُشع الإشعاعات فوق البنفسجية الناشئة من

الشرر في الثغرة الأولى G إلى الثغرات الأخرى، وهذا يضمن إمداد الإلكترونات المتحررة من إلكترونات الثغرة لتبدأ الانهيار أثناء الفترة القصيرة عند تعرض الثغرات لجهود زائدة.

يمكن أن يكون لمقاومة تحكم جبهة الموجة ثلاثة مواقع ممكنة:

١. داخل المولد تماماً.

٢. خارج المولد تماماً.

٣. جزئياً داخل وجزئياً خارج المولد.

الترتيب الأول (1) يكون غير مُرضي حيث إن المحاثة والسعة للأطراف الخارجية والحمل تُشكل دائرة تذبذبية تتطلب أن تكون مُخمدة بواسطة مقاومة خارجية. والترتيب الثاني (2) يكون غير مُرضي أيضاً حيث إن مقاومة الجبهة الخارجية المفردة سيكون عليها أن تقاوم، وبالرغم من ذلك فلزمن قصير جداً فإن الجهد المقنن الكامل سيتحول ليكون طويل بشكل غير مناسب وسيحتل فراغاً كبيراً. والتوافق بين الاثنين يكون هو الترتيب الثالث (3) كما هو مبين في الشكل 3.5 وبذلك يتم الاهتمام بكل من اقتصاد الفراغ وتخميد الذبذبة.

ويمكن أن نرى أن الشكل 3.5 يمكن أن يخفض إلى المولد الدفعي مفرد المرحلة الموضح في الشكل 3.4(b). وبعد إيقاد المولد فإن سعة التفريغ الكلية C_1 يمكن أن تعطى كالآتي:

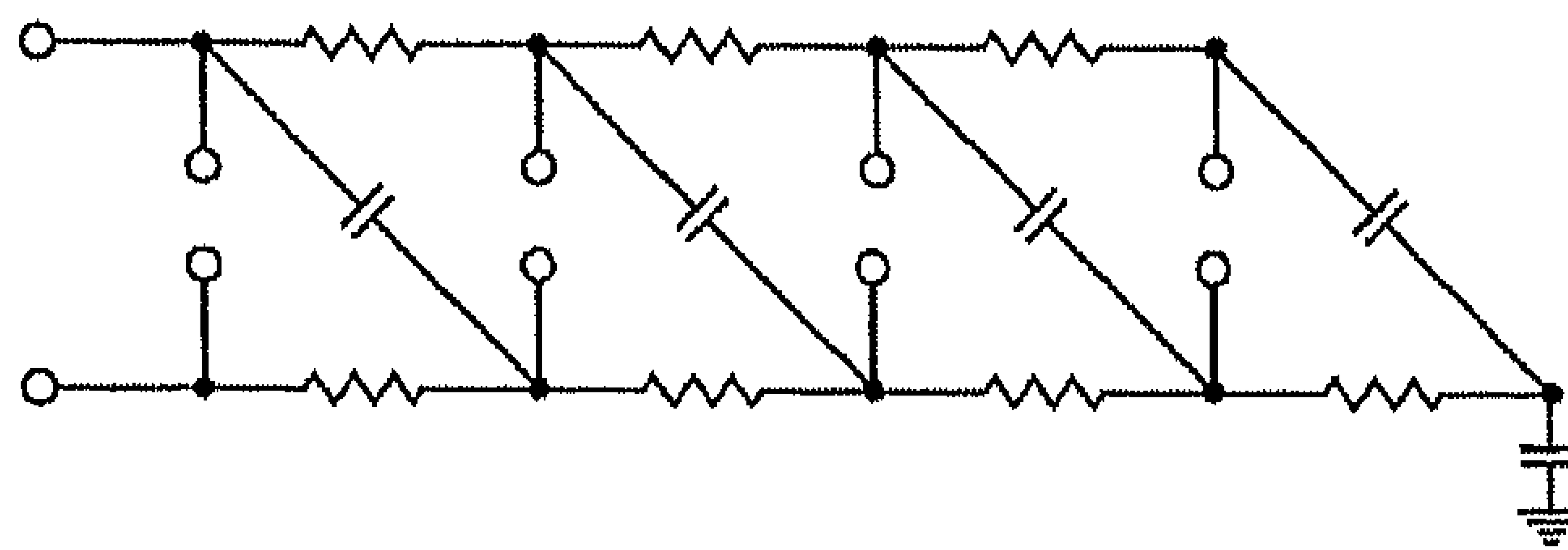
$$\frac{1}{C_1} = \sum^{n} \frac{1}{C_1'}$$

مقاومة الجبهة المكافئة:
$$R_1 = \sum^{n} R_1' + R_1''$$

ومقاومة تحكم الذيل المكافئة:
$$R_2 = \sum^{n} R_2'$$

حيث n = عدد المراحل.

وقد اقترح جودليت Goodlet دائرة أخرى موضحة في الشكل 3.6 لتوليد الجهود الدفعية حيث يكون الحمل مؤرض أثناء فترة الشحن، بدون ضرورة ثغرة العزل. جهد الخرج الدفعي له نفس القطبية مثل جهد الشحن في حالة دائرة ماركس، وهو معكوس في حالة دائرة جودليت. أيضاً -عند التفريغ- يكون كل من جانبي ثغرة الشرر الأولى يرفعان إلى جهد الشحن في دائرة ماركس ولكن في حالة دائرة جودليت فإنهما يحصلا على جهد أرضي.



الشكل 3.6: دائرة جودليت الأساسية

٣-٤ تركيب المولد الدفعي Construction of Impulse Generator

يتطلب المولد الدفعي مصدر قدرة d.c لشحن المكثف الدفعي C_1 للمولد. ويتكون المصدر من محول رافع ومقوِّم. أزمنة الشحن لا يجب أن تقل عن sec. (10–3) حيث إن كل تأثير للجهد سيترك وراءه تأثيرات تأين متقدمة، لذلك يجب أن يُسمح بوقت بين كل تأثيرين متتاليين حتى لا تؤثر التأثيرات متقدمة الإجهاد داخل العازلات على متانة الانهيار. ومتاح الآن مصدر d.c متحكم فيه بالثايريت thyristerized controlled.

ويمكن أن تصنع المقاومة من مادة مقاومة من السلك، السائل أو مركب [كربون ...إلخ]. مقاومات السائل والكربون لها سعة حرارية عالية، وهي لا تستخدم لمقاومات جبهة الموجة وتحكم الذيل حيث تكون غير مستقرة بشكل كبير. أي أن قيمتها ليست ثابتة ويمكن أن تتغير مع عدة عوامل. لذلك، تستخدم مقاومات من السلك الملفوف غير حثية لهذا الغرض بالرغم من كُلفتها. ووجد أنه لمعظم الدوائر إذا كان الثابت الزمني لهذه المقاومات أقل من 0.1 μ sec. فإنها تعتبر مُرضية من وجهة نظر التذبذب في الدائرة. ويجب أن توضع هذه المقاومات بحيث يمكن تغييرها واستبدالها بسهولة حيث يجب أن تشحن عند كل مطلب لشكل موجه خاص.

تخطيط أي مولد دفعي يُقرر أساساً بنوع المكثفات المستخدمة. المكثفات المعزولة بالورق المشبع بالزيت يكون لها محاثة منخفضة ومعدل عالي للتفريغ ولذلك تستخدم عادة. الزيت المعدني يستبدل بموائع خاصة ذات منفذية كهربية permittivity أعلى لتخفض من حجم المكثف عند نفس السعة. بعض التصميمات تستخدم مكثفات مُشرّبة بالزيت في حاويات عازلة. هذه المكثفات لها عازل كهربي مُجمع في اسطوانة عازلة من البورسلين أو الورق المورنش مع ألواح معدنية مستوية. ويتميز هذا النوع من المكثفات بإمكانية بناء مراحل متتالية من المكثفات في أعمدة رأسية، وكل مرحلة تفصل عن المجاورة لها بدعائم بنفس الشكل مثل المكثفات ولكن بدون العازل الكهربي. وحديثاً، أُوصيّ بتركيبات معيارية مع وحدات مكثف بسيطة داخل

اسطوانات عازلة أو أوعية أو داخل خزانات معدنية وجلبن وهي مستخدمة حالياً. وهذه التصميمات أصبحت ممكنة بسبب استخدام عوازل عالية العزل الكهربي [مثل SF_6] والتي يمكن أن تخفض حجم المكثفات بشكل ملحوظ.

وترتب ثغرات الكرة المتقاربة واحدة فوق الأخرى على أذرع أفقية ويتم ضبط الثغرات بواسطة محرك متحكم فيه عن بعد مع وجود مبين indicator. هذا النظام مع التعرض المتبادل للإشعاع يضمن تعاقب تام لثغرات الشرر. وهي عادة ما تكون محفوظة داخل كبسولات في مدخنة مزودة بهواء خالي من الرماد والرطوبة. استخدام مخلوطات من الغازات المناسبة يعطي أداءً جيداً لتشغيل المفاتيح.

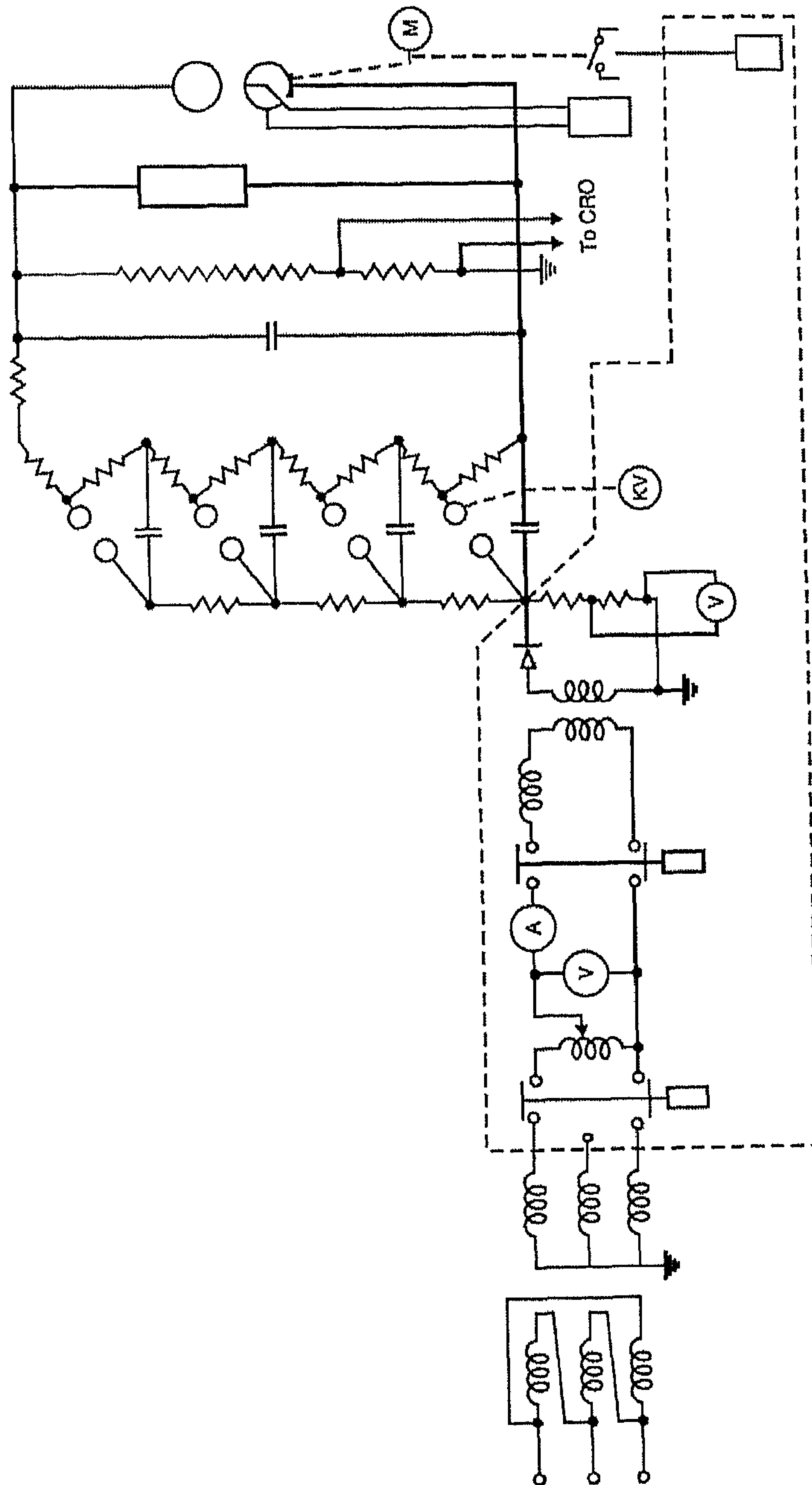
المولد الدفعي يجب أن يشمل جهازاً لتأريض المكثفات غير المشغلة. المكثفات d.c يمكن أن تبني جهود عالية بعد زمن قصير من دائرة القصر بسبب ظاهرة الـ relaxation. ويجب تواجد مقاومة وقاية على التوالي في جهاز التأريض هذا لتجنب تيارات التفريغ العالية جداً.

مقاومات الجبهة والذيل تثبت مع إطار المولد بواسطة حاملات مقاومات من أنابيب الورق المبكلت bakalised. مقاومات الشحن تثبت بطول عمود ثغرة الكرة. كل الأطراف والإلكترودات داخل المولد يجب أن تُحدد أبعادها بشكل جيد ومناسب لتجنب تفريغات الكورونا الشديدة جداً أثناء فترة الشحن. ويوضح الشكل 3.7 دائرة مولد دفعي نموذجية مع كل التفاصيل.

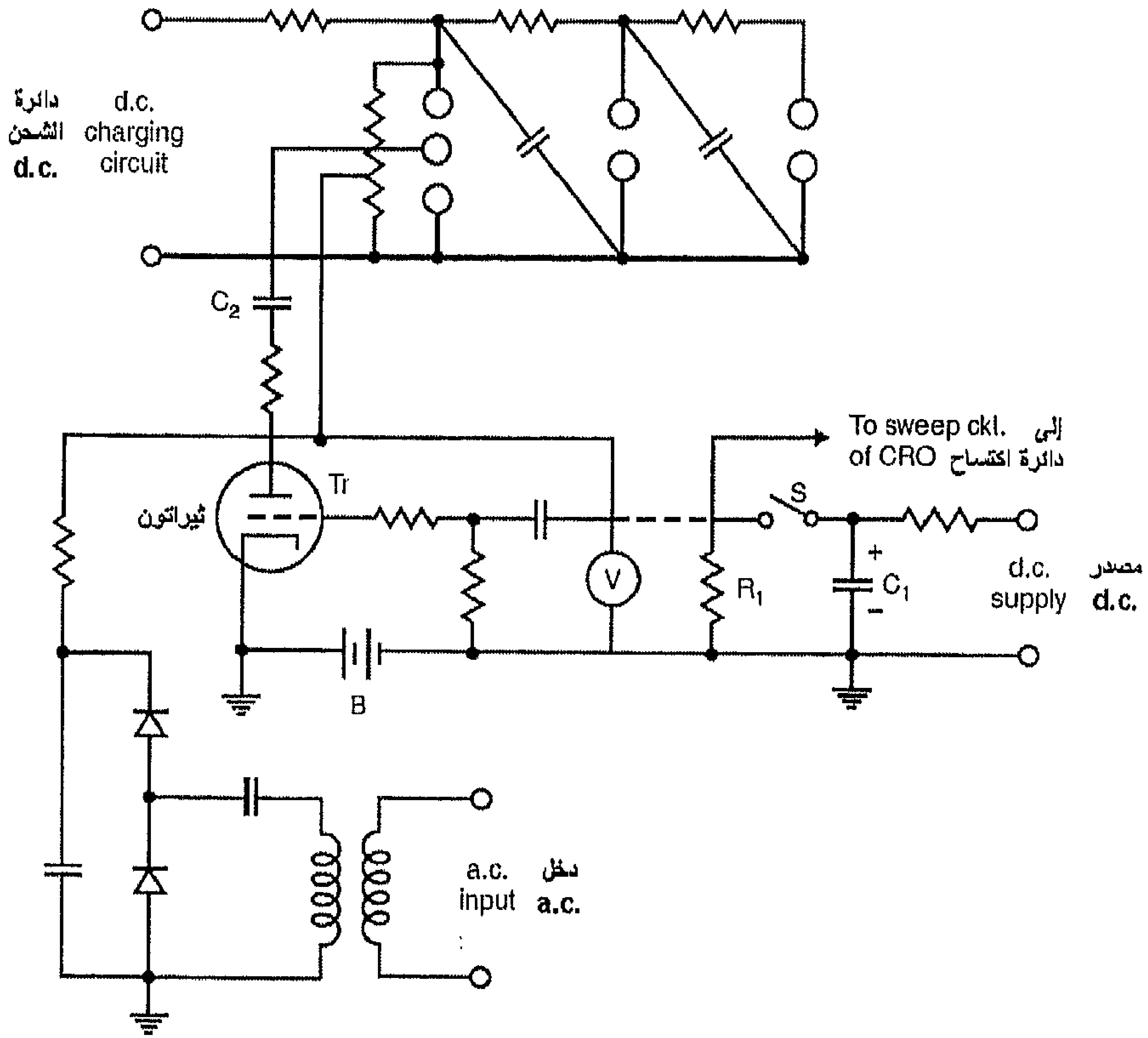
٣-٥ بدء وتزامن المولد الدفعي Triggering & Synchronisation of the Impulse Generator

تشغل المولدات الدفعية عادة في ترابط مع مَرْسَمة تذبذب [أوسليجراف oscillograph] للقياس ولدراسة تأثير الموجات الدفعية على أداء عزل المعدات. وحيث إن الموجات الدفعية تكون ذات دوام أقصر، فمن الضروري أن يتزامن بدقة تشغيل المولد والأسليجراف وإذا كان مطلوباً أن تسجل جبهة الموجة للموجة بدقة فيجب أن تبدأ دائرة الاكتساح الزمنية time sweep circuit للأوسليجراف عند زمن قليل قبل أن تصل الموجة الدفعية إلى ألواح الانحراف.

ويبدأ المولد الدفعي نفسه تشغيل الدائرة الاكتساحية للأوسليجراف، ويكون عندئذ من الضروري توصيل كابل تأخير بين المولد أو مقسم الجهد وألواح الانحراف للأوسليسكوب حتى تصل الموجة الدفعية إلى الألواح عند زمن متحكم فيه بعد أن يُفصل الاكتساح. ومع ذلك، فإن استخدام كابل تأخير يؤدي إلى عدم دقة في القياس. ولهذا السبب، تم تطوير بعض دوائر الإعتاق tripping circuits حيث تشغل دائرة الاكتساح أولاً ثم بعد زمن حوالي (0.1–0.5) μ sec. يبدأ المولد.



الشكل 3.7: دائرة مولد دفعي

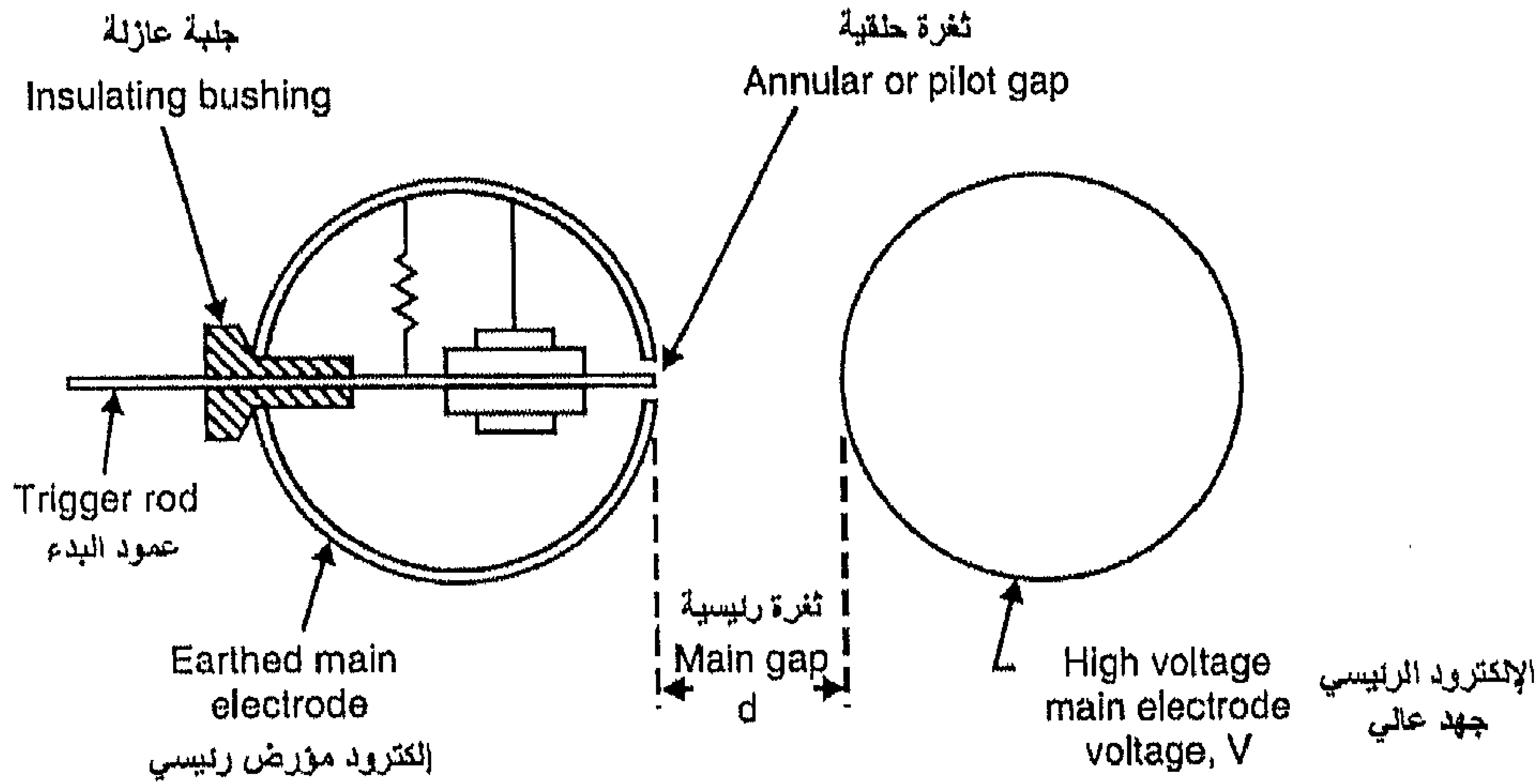


الشكل 3.8: دائرة التزامن

أحد الطرق تشمل استخدام ثغرة من ثلاث كرات في المرحلة الأولى من المولد كما هو مبين في الشكل 3.8. ويضبط التباعد بين الكرات بحيث تكون ثغرتي التوالي قادرة على مقاومة فولت الشحن للمولد الدفعي. وتوصل مقاومة عالية بين الكرات الخارجية وتوصل بالنقطة المركزية لها بكرة التحكم حتى يقسم الفولت بين الكرات الخارجية بالتساوي بين الثغرتين. والآن إذا شحن المولد إلى جهد [فولت] أقل قليلاً من جهد انهيار الثغرات، فإن الانهيار يمكن أن يتحقق عند أي لحظة بالتأثير بدَفْعَه ذات أي قطبية وأي جهد ذروي ليس أقل من خُمس جهد الشحن إلى كرة التحكم.

ويتم شرح العملية كالتالي: يغلق المفتاح S الذي يبدأ دائرة الاكتساح للأوسيلجراف. وتؤثر نفس الدَفْعَة على شبكة أنبوب الثيراتون. التأخير الزمني الأصلي للثيراترون يضمن أن تبدأ دائرة الاكتساح في التشغيل قبل بدء دفعة الجهد العالي. ويمكن تقديم مزيد من التأخير إذا طلب بواسطة دائرة السعة–المقاومة R_1C_1. وتؤثر نبضة [دفعة] التعتيق خلال المكثف C_2.

أثناء فترة شحن المولد يكون آنود الثيراترون عند جهد موجب حوالي 20 kV، والشبكة عند جهد سالب بمساعدة بطارية B حتى لا توصل أثناء فترة الشحن. وحيث يكون المفتاح S مغلق، تؤثر نبضة البدء على شبكة أنبوب الثيراترون الذي يوصل وتؤثر نبضة سالبة 20 kV على الكرة المركزية التي تبدأ المولد الدفعي [النبضي].

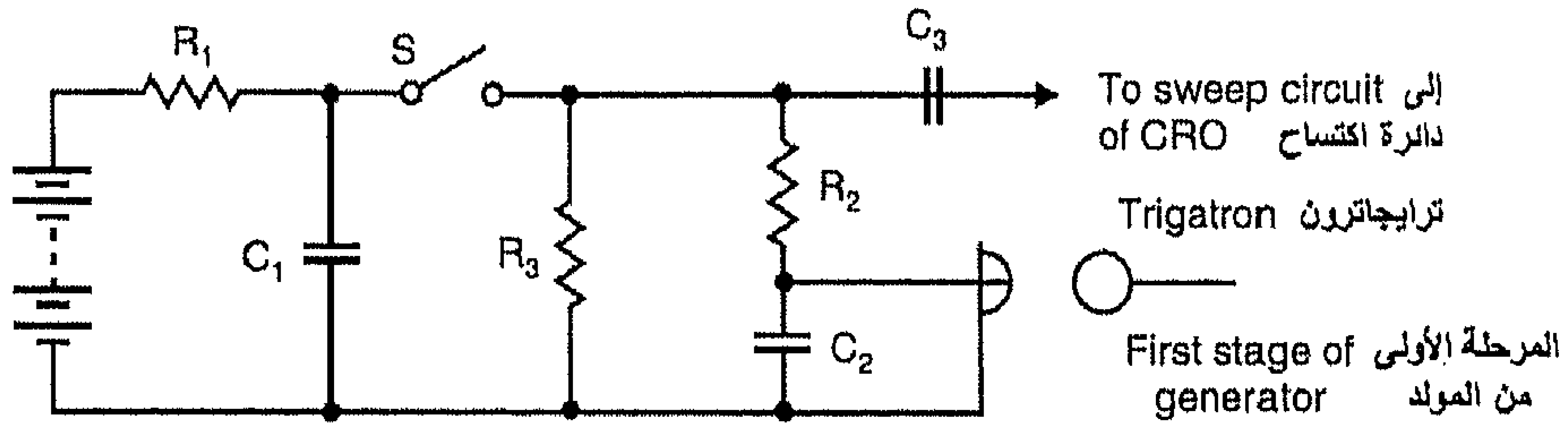


الشكل 3.9: ثغرة شرر ثلاثية الإلكترود trigatron

الشكل 3.9 يوضح ثغرة ثلاثية الإلكترود [ترايجاترون trigatron] تستخدم كالثغرة الأولى للمولد النبضي [الدفعي] وتتكون أساساً من ثلاثة إلكترودات. إلكترود الجهد العالي يكون كرة والإلكترود المؤرض يمكن أن يكون كرة، نصف كرة أو أي شكل آخر يعطي مجال كهربي متجانس. وتثقب فتحة صغيرة في الإلكترود المؤرض يتم إسقاط عمود معدني فيها. وتكون الثغرة الحلقية بين العمود ونصف الكرة المحيط حوالي 1 mm . وتركب أنبوبة زجاجية فوق إلكترود العمود وتحاط بواسطة رقيقة معدنية والتي تكون موصلة بنصف الكرة المؤرض. ويشكل العمود المعدني أو إلكترود البدء الإلكترود الثالث، ويكون أساساً عند نفس الجهد مثل الإلكترود المثقوب، حيث إنه موصل به خلال مقاومة عالية، ولذلك فإن نبضة التعتيق أو التحكم يمكن أن تؤثر بين هذين الإلكترودين. عندما تؤثر نبضة التعتيق على العمود، يتشوه المجال في الثغرة الرئيسية وفيما بعد ينهار عند جهد أقل من ذلك المطلوب لإحداث الانهيار في غياب نبضة التعتيق. وظيفة الأنبوب الزجاجي هي إنجاح تفريغ الكورونا حول العمود حيث إنها تسبب تأين ضوئي في الثغرة الحلقية والثغرة الرئيسية وبالتالي تسهل من الانهيار السريع لهم.

بالنسبة للمولدات النبضية وحيدة المرحلة أو متعددة المراحل وجدت ثغرات الترايجاترون رضاً كبيراً وهي تتطلب جهد تعتيق حوالي 5 kV من أي قطبية. دوائر التعتيق المستخدمة اليوم متاحة تجارياً وتعطي عامة 2 أو 3 نبضات تعتيق ذات سعات أقل. الشكل 3.10 يبين دائرة تعتيق نموذجية. يشحن المكثف C_1 خلال مقاومة عالية R_1، وحيث يكون المفتاح المتحكم فيه عن بعد S مغلقاً، تؤثر نبضة على دائرة اكتساح الأوسيلجراف من خلال المكثف C_3. وفي نفس الوقت، يشحن المكثف C_2 وتؤثر نبضة تعتيق على إلكترود البدء للترايجاترون. التأخير المطلوب في بدء المولد يمكن تحقيقه بالضبط المناسب لقيم R_2، C_2. ويمكن تفريغ الشحنة المتبقية على C_2 من خلال مقاومة عالية R_3. وتستخدم أيضاً الليزرات الآن في تعتيق ثغرة الشرر.

أيضاً للترايجاترون دائرة إزاحة طور مرتبطة به لتزامن زمن البدء مع جهد متردد خارجي. وهكذا من الممكن اتحاد اختبارات الجهد المتردد العالي مع موجة نبضية مركبة لزاوية طور قابلة للضبط.



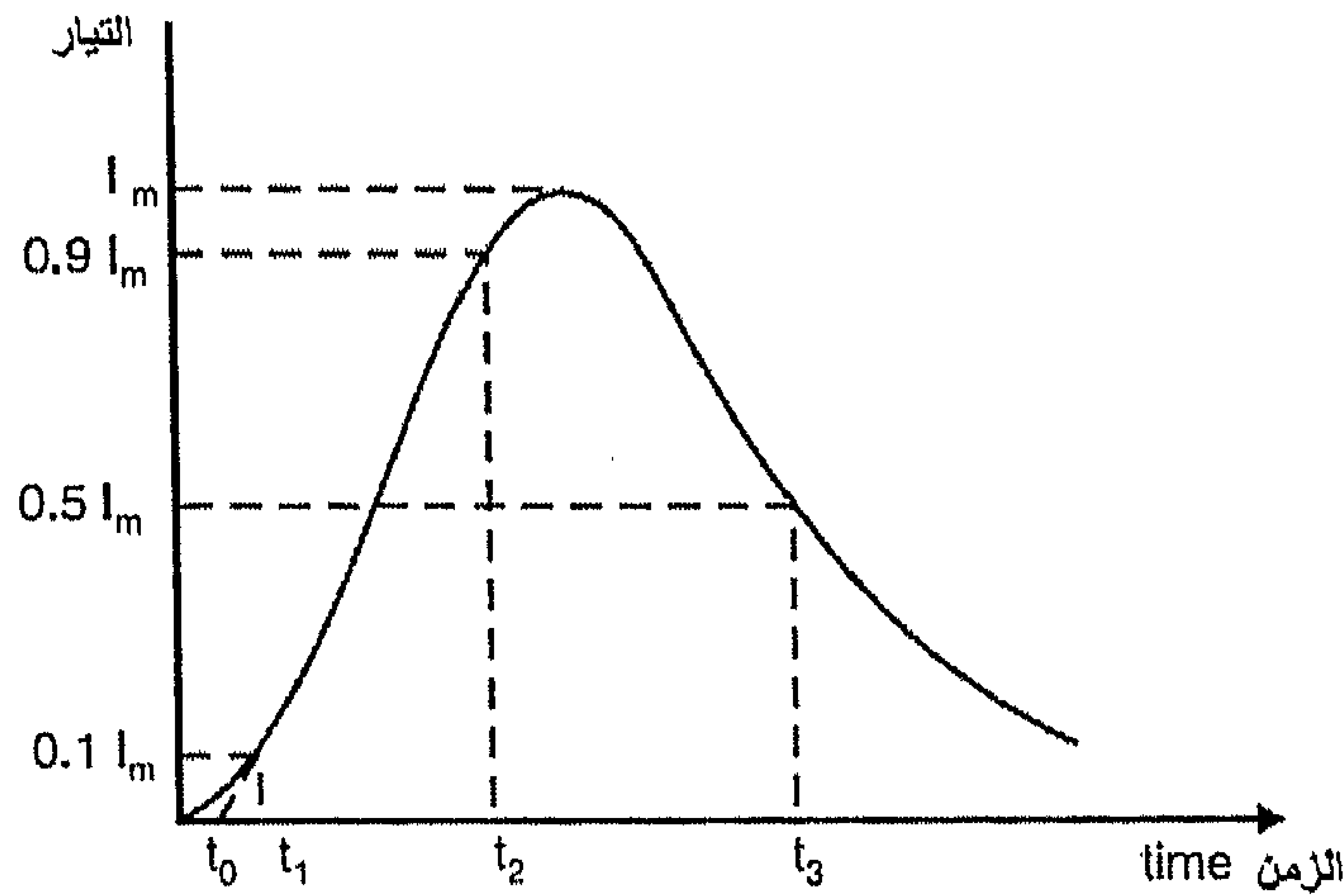
الشكل 3.10: دائرة تعتيق نموذجية لترايجاترون

والترايجاترون مصمم لمنع الشحن الزائد للمكثفات النبضية في حالة حوادث فشل البدء. ويبين جهاز البيان ما إذا كان المولد سيعمل بالطريقة السليمة أم لا. وتم التزود بدائرة تغذية عكسية إضافية لشطر الموجة الآمن وتحرر الأوسيلجراف، مستقلاً عن نبضة التحكم المنبعثة.

٣-٦ توليد التيار الدفعي [النبضي] Impulse Current Generation

تحدد موجة التيار الدفعي بخطوط مماثلة لموجة الجهد الدفعي. ويوضح الشكل 3.11 موجة تيار نبضي نموذجية.

وتتكون مولدات التيار الدفعي عادة من عدد كبير من المكثفات الموصلة على التوازي بمسار تفريغ مشترك. ويوضح الشكل 3.12 دائرة مولد تيار دفعي نموذجية.



الشكل **3.11**: موجة تيار نبضي نموذجية

الدائرة المكافئة للمولد موضحة في الشكل 3.13 حيث المكثف C يشحن إلى جهد V_0 الذي من الممكن أن يعتبر أن يفرغ خلال محاثة L ومقاومة R. وعملياً فإن كل من L ، R يكونا هما المحاثة والمقاومة المؤثرتان على الموصلات، المكثفات وعينة الاختبار.

تحليل مولد التيار النبضي بالرجوع للشكل 3.13

بعد أن تبدأ الثغرة S ، يكون تيار تحول لابلاس كالتالي:

$$I(s) = \frac{V_0}{s}\frac{1}{R + sL + \frac{1}{Cs}}$$

$$= \frac{V}{L}\cdot\frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}\cdot s + \frac{1}{LC}} = \frac{V}{L}\cdot\frac{1}{(s+\alpha)^2 + \omega^2}$$

حيث

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

و

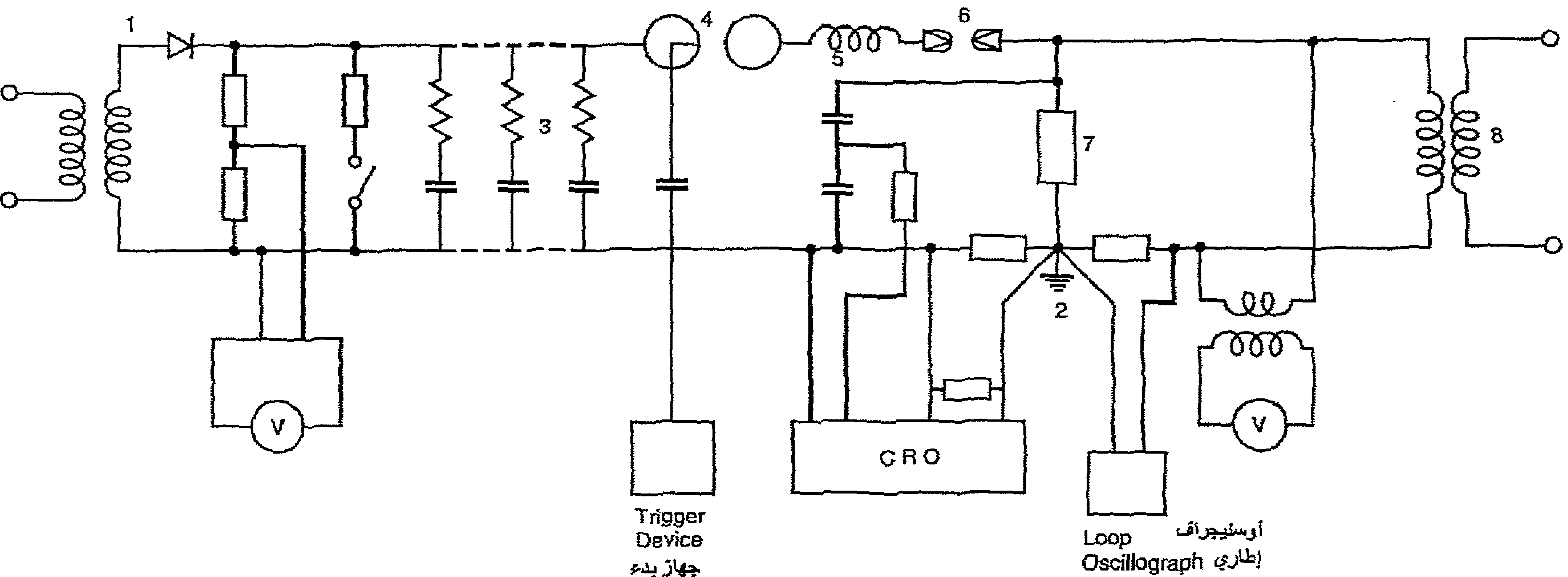
$$\omega = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

أو

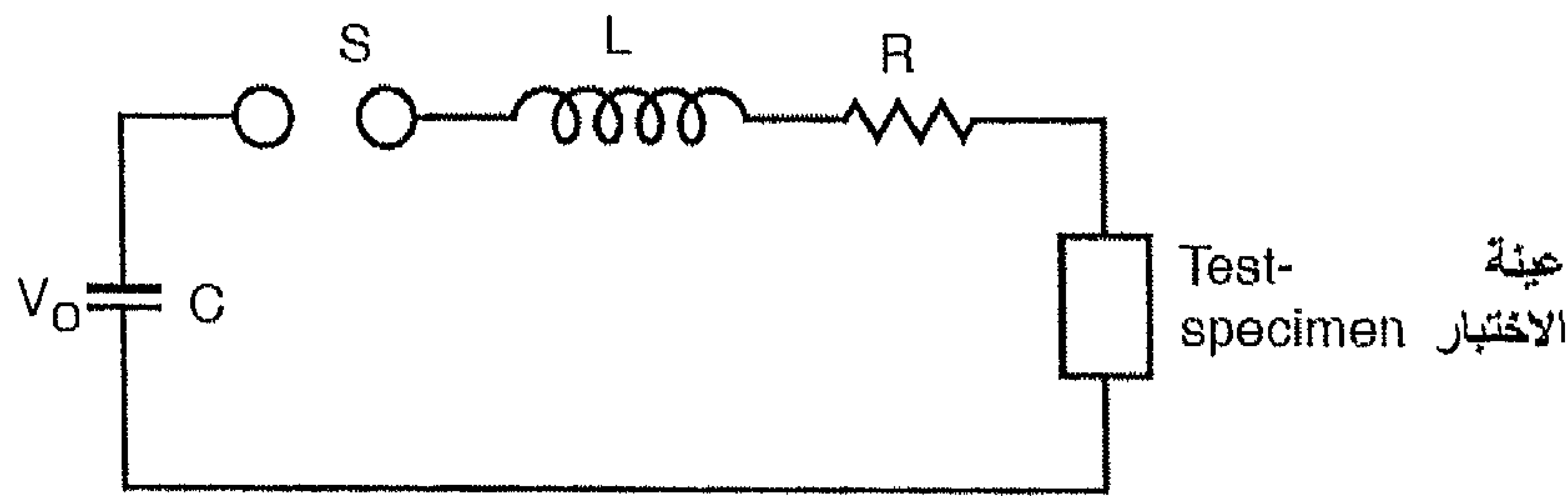
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}\left(1 - \frac{R^2C}{4L}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}\left(1 - \nu^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

حيث

$$\nu = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$$



الشكل 3.12: دائرة مولد تيار نبضي نموذجية. (1) وحدة شحن؛ (2) جهاز تأريض؛ (3) مكثفات مع مقاومات مخمدة؛(4) ثغرة كروية؛ (5) ملف مفاعل؛ (6) كرة حماية؛ (7) عينة الاختبار؛ (8) محول اختبار لتردد القدرة



الشكل 3.13

وبأخذ معكوس لابلاس نحصل على التيار:

$$i(t) = \frac{V}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \qquad (1.3)$$

وللحصول على أقصى تيار، فإن $\frac{di(t)}{dt} = 0$، ومنها نحصل على $t_{max} = \frac{\theta}{\omega}$، حيث t_{max} هو الزمن عند حدوث القيمة القصوى الأولى للتيار،

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\omega}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} = \sin^{-1} \sqrt{LC}\,\omega$$

أو

$$t_{max} = \sqrt{LC} \frac{\sin^{-1}\left(1-\nu^2\right)^{1/2}}{\left(1-\nu^2\right)^{1/2}}$$

وبالتعويض عن قيمة $t = t_{max}$ في المعادلة (3.1) فإن أول قيمة قصوى للتيار تعطى كالتالي:

$$I_{max} = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} f(\nu) = \sqrt{\frac{2W}{L}} f(\nu) \qquad (2.3)$$

$$W = \frac{1}{2} C V_0^2$$

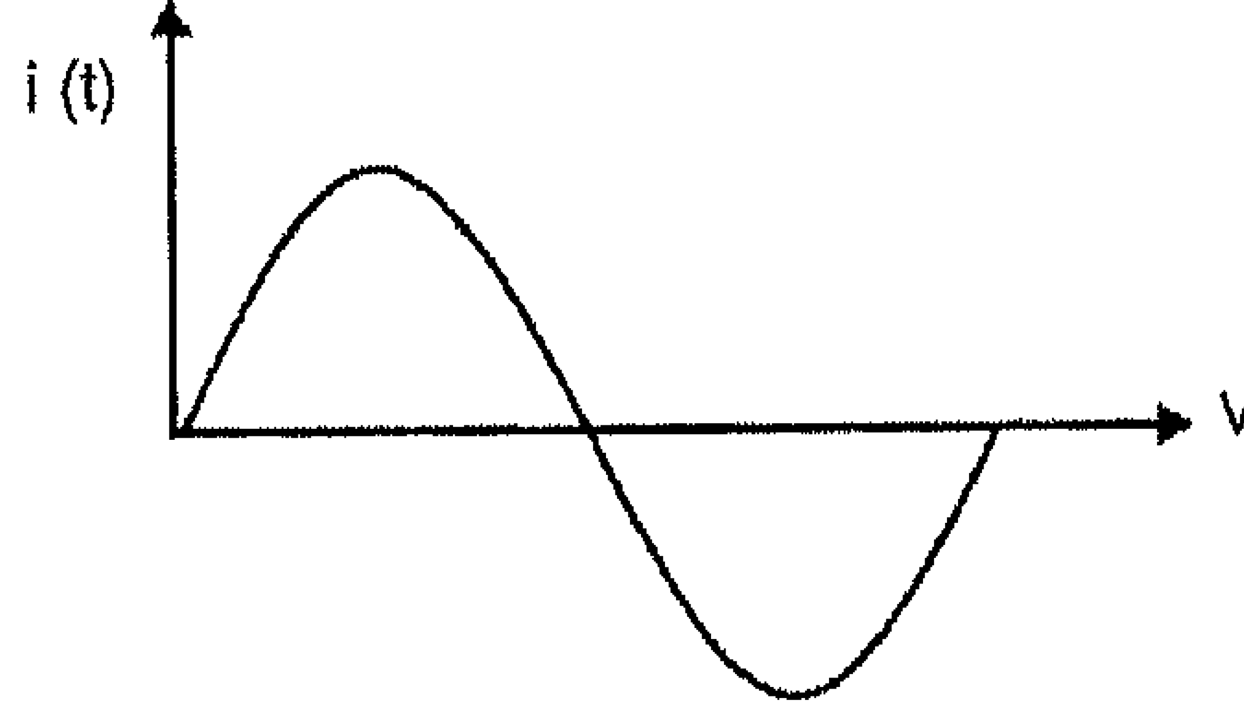
حيث W= الطاقة الابتدائية المخزنة في المولد.

إذا كان $R = 0$ ، $\nu = 0$، فمن الواضح أن $I = V_0 \sqrt{C/L}$،

$$i(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}} \qquad (3.3)$$

ويوضح الشكل 3.14 استجابة التيار للقيم المختلفة لـ ν. واضح من المعادلتين (3.2)، (3.3) أنه لأقصى قيمة للتيار فإن محاثة التيار يجب أن تكون منخفضة لطاقة ابتدائية معطاة W. القيمة

العادية لـ $f(\nu)$ بدون إضافة عناصر خمد تتراوح بين (0.85–0.95).



الشكل 3.14: استجابة التيار لدائرة الشكل 3.13

يمكن إنتاج نبضات وحيدة الاتجاه بالتخميد مع مقاومة إضافية. ومع ذلك، فإن هذا يؤدي إلى قيمة ذروة منخفضة للتيار، فمثلاً قيمة التيار أثناء الخمد الحرج $R=2\sqrt{L/C}$ يكون حوالي 0.368 من قيمته عندما لا يوجد خمد $R=0$. وقد وجد أنه يمكن الحصول على شكل موجة وحيدة الاتجاه تقريباً باستخدام مقاومة خمد غير خطية في الدائرة مع خفض I_m حوالي $0.7V_0\sqrt{C/L}$ فقط. المحاثة المؤثرة للوحدة يمكن أن تخفض بواسطة التقسيم الفرعي للسعة C إلى مجموعات من وحدات أصغر.

في التصميم النموذجي توضع عدة وحدات مكثف موصلة توازي حول عينة الاختبار على شكل حدوة فرس مع أدنى قطر. الموصلات بين المكثفات وعينة الاختبار تكون أقصر ما يمكن وتوضع في خطوط متوازية ضيقة. وكبديل، يمكن استخدام كابلات محورية أيضاً حيث إن لها محاثة منخفضة جداً.

وعادة في خطوط نقل الجهد العالي الطويلة ينتشر موجة مربعة من التيار النبضي أثناء تفريغ هذه الخطوط. ويمكن أن تتولد هذه الموجات بمحاكاة خطوط صناعية بمساعدة مكثف موصل على التوازي مع الخانق choke. عدد العناصر يتناسب عكسياً مع التموج المسموح به على الموجة المربعة.

أسئلة

٣-١ عرِّف المصطلحات الآتية:

(أ) جهود دفعية [نبضية]. (ب) موجة مشطورة.

(ج) جهد شرر نبضي. (د) النسبة الدفعية للتثقب.

٣-٢ ارسم وقارن الدائرتين المكافئتين المبسطتين للمولد النبضي.

٣-٣ ارسم الدائرة المكافئة المضبوطة للمولد النبضي وبين أهمية كل بارامتر مستخدم.

٣-٤ اشتق علاقة لكفاءة الجهد لمولد دفعي مرحلة واحدة.

٣-٥ اشرح تركيب، مبدأ تشغيل وتطبيق مولد ماركس متعدد المراحل.

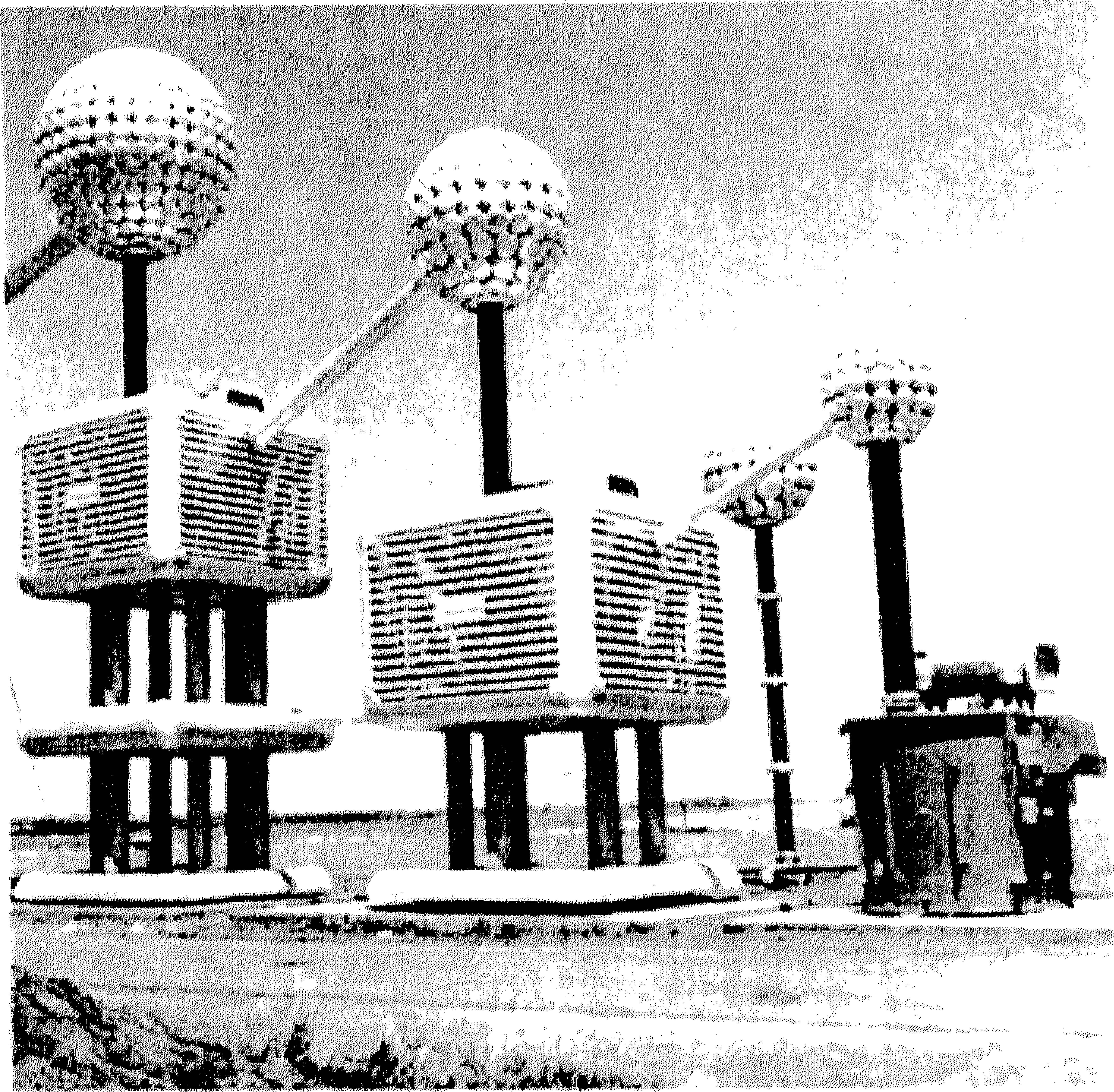
٣-٦ اشرح دائرة جودليت لتوليد الجهد الدفعي. قارن الأداء مع دائرة ماركس.

٣-٧ صف تركيب المكونات المختلفة المستخدمة لتطوير المولد الدفعي.

٣-٨ اشرح بدء وتزامن المولد النبضي مع CRO.

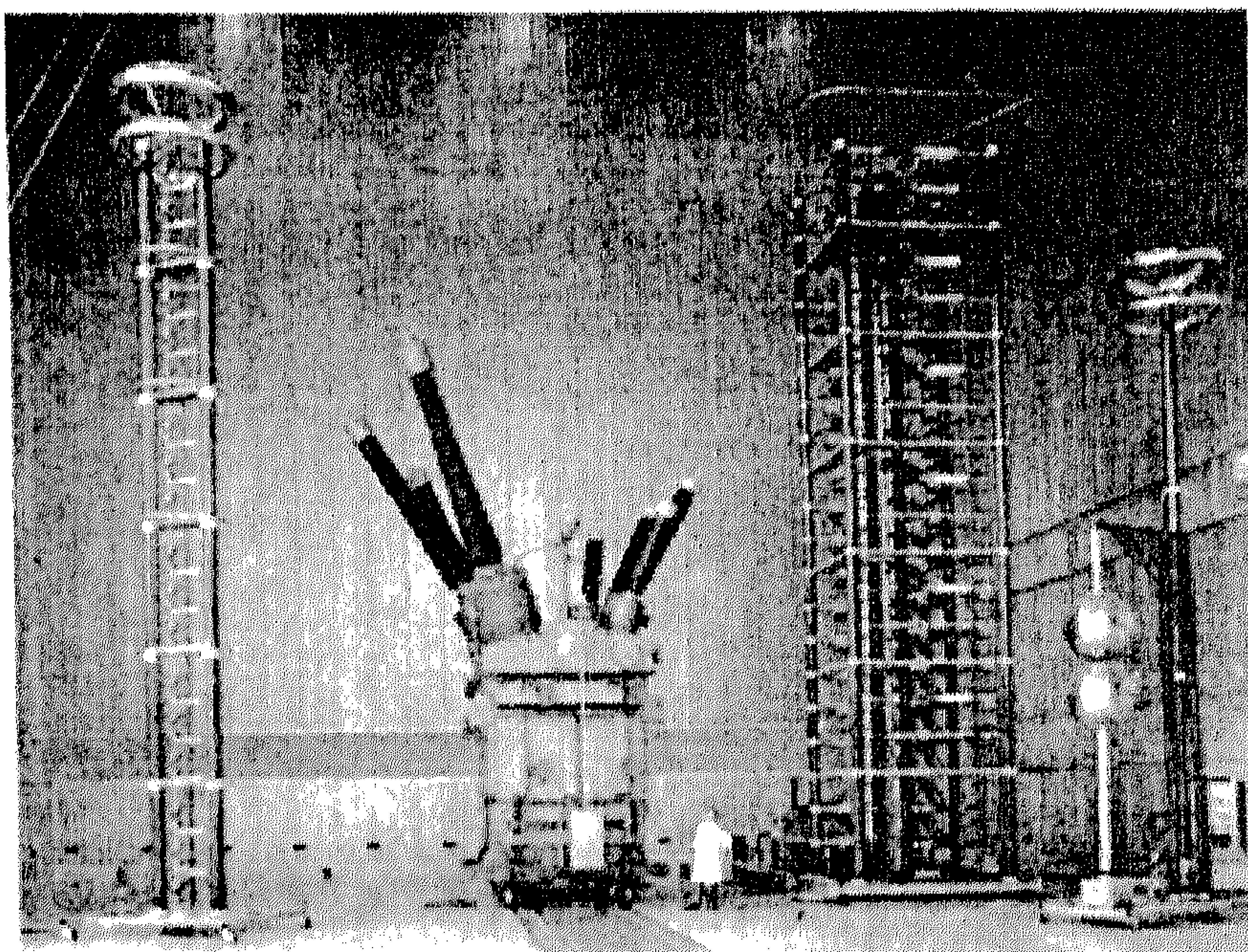
٣-٩ ارسم دائرة مولد تيار نبضي نموذجي. واشرح التشغيل والتطبيق.

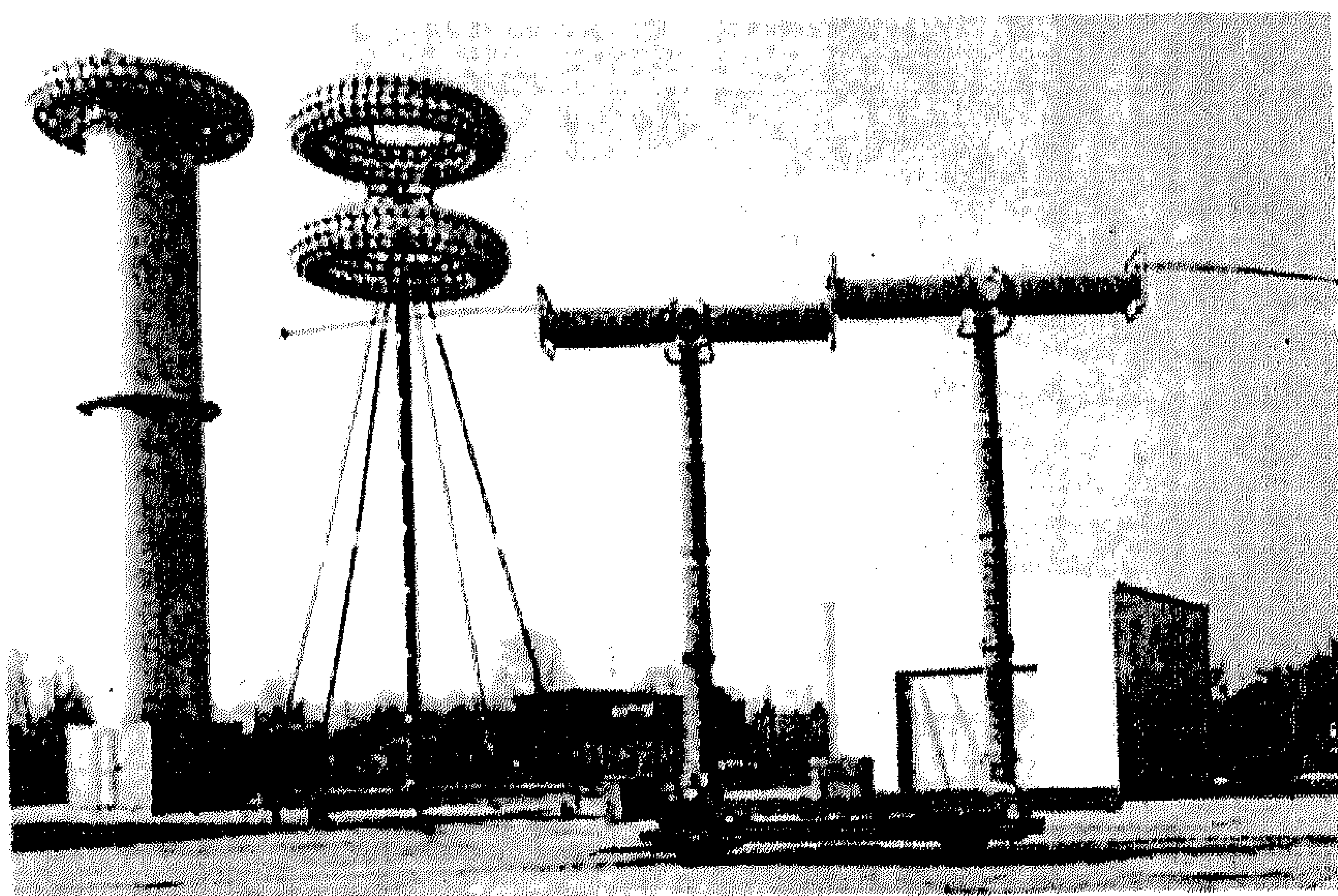
٣-١٠ ارسم مخطط لدائرة مولد تيار عالي. وبين كيف يتم التحكم في شكل الموجة.



Three-stage cascade transformer 3 X 600 kV, 2 A cont. outdoor type with AC voltage divider 1500 kV

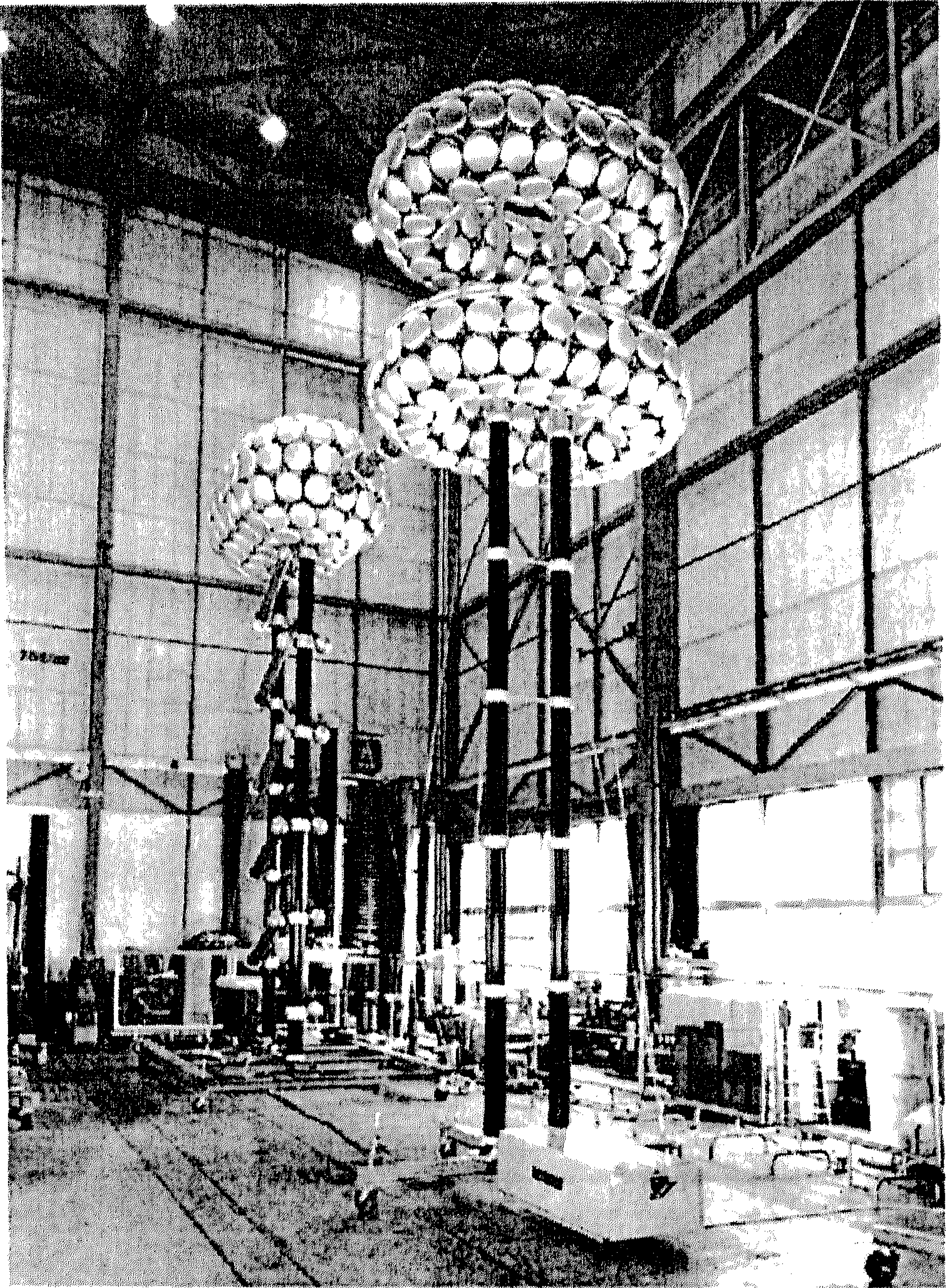
الشكل 3.15: محول تعاقبي ثلاث مراحل





Large impulse voltage generators
Above: Indoor 4000 kV
Below: Outdoor 6400 kV shown together with typical test objects
Above: Large power transformer (center)
Below: Power circuit breakers (foreground right)

الشكل 3.16: مولدات جهد نبضي كبيرة



DC voltage test set 2000 kV, 10 mA for testing power cables, including a HV measuring resistor and automatic grounding system (foreground)

الشكل 3.17: مجموعة اختبار جهد d.c لاختبار الكابلات



Large outdoor impulse voltage dividers, damped capacitive type with large top electrode for ultra-high switching impulse voltages

الشكل 3.18: مقسم جهد دفعي خارجي كبير



الخصائص الكهربية والميكانيكية للعازلات

Electrical & Mechanical Characteristics of Insulators

٤-١ الخصائص الكهربية Electrical Characteristics

لعزل الأجزاء المنفصلة من التركيبات الكهربية ذات الجهود المختلفة -أولاً- من الضروري فصلهم عن بعضهم بمسافة محددة لكي يعمل الهواء كوسط عازل رئيسي. وعند أماكن التثبيت، تُعزل الموصلات أو قضبان التوصيل عن المنشآت الداعمة المؤرضة [أبراج خط النقل] بمساعدة عازلات مصنوعة من البورسلين.

ويمكن أن يحدث انهيار للمتانة الكهربية للعازل بواسطة تثقيب العازل الكهربي الصلب [البورسلين] أو بسبب الشرر في الهواء عبر سطح العازل. في الحالة الأولى، يخرج العازل تماماً من الخدمة حيث إن خواصه الكهربية لم تُستعاد، وبعيداً عن ذلك فأثناء التثقب يمكن أن يُدَمْر العازل ميكانيكياً. في الحالة الثانية، يمكن أن يُدَمْر العازل فقط بسبب الفعل الحراري للقوس على سطحه. وإذا حدث بعد الشرر، إن أُزيل الجهد بسرعة عن العازل -مثلاً- تحت تأثير فعل حماية مُرِّحل، يبقى العازل بدون تدمير في معظم الحالات. لذلك، فجميع العازلات تُبنى بحيث يكون جهد تثقيبها أعلى من جهد الشرر لها عبر السطح.

وبهذا الأسلوب فإن المتانة الكهربية للعازلات تتميز بجهود شرر أو تفريغ [عبر السطح]. تقدير المتانة الكهربية وقيم الجهد التي يمكن أن تقاوم بواسطة العوازل بدون شرر تنفذ على أساس ثلاث خصائص عامة:

١. جهد الشرر الجاف عند تردد القدرة.

٢. جهد الشرر المبلل [الرطب] عند تردد القدرة.

٣. خصائص الجهد-ثانية المتحصل عليه عند موجة جهد قياسية [دفعية].

جهود الشرر عند تردد القدرة يمكن أن يخدم كمقياس للمتانة الكهربية للعازلات ضد الجهود الزائدة الداخلية. خصائص الجهد-ثانية تحدد متانة العازلات تحت الجهود الزائدة الجوية.

جهد الشرر الجاف عند 50 cycles هي الخاصة الرئيسية للعازلات الخاصة بالعمل في أماكن مغلقة in door، أي لما يسمى بـ"عازلات التركيبات الداخلية". ويحدد جهد الشرر الجاف لسطح عازل جاف ونظيف. ولحالات المقارنة، ترجع جهود الشرر إلى شروط الجو العادية. ويتناسب جهد الشرر الجاف للعازلات مع كثافة الهواء النسبية

$$\delta = 0.386\frac{P}{T}$$

لذلك فإن جهد الشرر الجاف V المحدد عند كثافة هواء نسبية δ يخفض إلى جهد شرر V_{av} عند كثافة الهواء العادية $\delta = 1$ حسب الصيغة:

$$V_{av} = \frac{V}{\delta}$$

جهد الشرر الجاف عند تردد القدرة يزداد بزيادة رطوبة الهواء. جهد الشرر المتحصل عليه عند رطوبة معطاة للهواء ينخفض إلى رطوبة الهواء المطلقة العادية $11\ gr/M^3$ وذلك بضرب جهد الشرر بالمعامل k المحدد من النوموجراف في الشكل 4.1. وبهذه الطريقة، سنحصل على جهد الشرر الجاف V_{av} مُحوَّلاً إلى الشروط الجوية العادية بواسطة الصيغة:

$$V_{av} = V\frac{k}{\delta} \tag{1.4}$$

حيث $k =$ معامل التصحيح.

جهد الشرر المبلل له أهمية كبيرة لعوازل التركيبات الخارجية [الهواء المفتوح]. ويعتمد جهد الشرر المبلل إلى درجة كبيرة، على شدة الأمطار، اتجاه وشكل نافورة المطر، وعلى موصلية مياه الأمطار. ولكي نكون قادرين على مقارنة جهود الشرر المبللة، فإن الأمطار توحد قياسياً. ففي روسيا يكون المطر ذو متانة 3 mm/min.، مقاومة نوعية للماء ρ حوالي $10^4\ \Omega\ cm$ (عند $t = 20°C$) مع اتجاه يعمل زاوية 45° مع محور العازل، يُقبل لتحديد جهد الشرر المبلل. نافورات الأمطار يجب أن يكون لها تركيب مثل القطرة.

ويعتمد الشرر المبلل للعازلات على كثافة الهواء. وأظهرت التجارب أن الضغط الجوي فقط

يبذل تأثيراً هاماً بينما درجة الحرارة ليست لها أهمية. ولزيادة في جهد الشرر المبلل مع زيادة الضغط الجوي ليست هي نفسها لعازلات ذات تركيبات مختلفة. مسار التفريغ يمر بطول الأسطح المبللة لأي عازل وبطول ثغرات الهواء التي تتبع بعضها البعض في توال. وكلما زاد كسر الثغرة الهوائية في مسار التفريغ، ازداد تأثير الضغط الجوي على مقدار الشرر المبلل. في المتوسط لكل العازلات، أخذ أن نصف طول المسار يتكون بواسطة الثغرات الهوائية. تحت هذا الفرض فإن جهد الشرر المبلل عند الضغط الجوي العادي $(V_{wft})_N$ وجهد الشرر المبلل V المحدد عند ضغط يختلف عن العادي، مرتبطان بالعلاقة:

$$V = (V_{wft})_N \left[0.5\left(1+\frac{P}{760}\right)\right] \tag{2.4}$$

وتُحدد خصائص الفولت–ثانية فقط لأسطح العازل النظيفة والجافة حيث عند الجهود النبضية يخفض المطر المتانة الكهربية للعازلات بـ %(3–2). ونحصل على الخصائص عند موجة قياسية 1.5/40 µ sec. من كلا القطبيتين. وتحوِّل جهود الشرر النبضية إلى الشروط الجوية العادية بمساعدة المعادلة (4.1). ويبقى الآن أن نعتبر أن معاملات التصحيح للرطوبة المعطاة في الشكل 4.1 هي للموجة المشطورة عند زمن أكبر من 10 µ sec. . وتحت فعل الموجة المشطورة عند زمن أقل من 10 µ sec.، فإن التصحيحات تُخفض تناسبياً إلى زمن التفريغ. فمثلاً، دعنا نعتبر الموجة المشطورة عند 5 µ sec. . حسب نوموجراف الشكل 4.1 $k = 1.06$ أي أن التصحيح للموجة الكاملة يكون 0.06. للموجة المشطورة عند 5 µ sec. سيكون التصحيح للرطوبة هو:

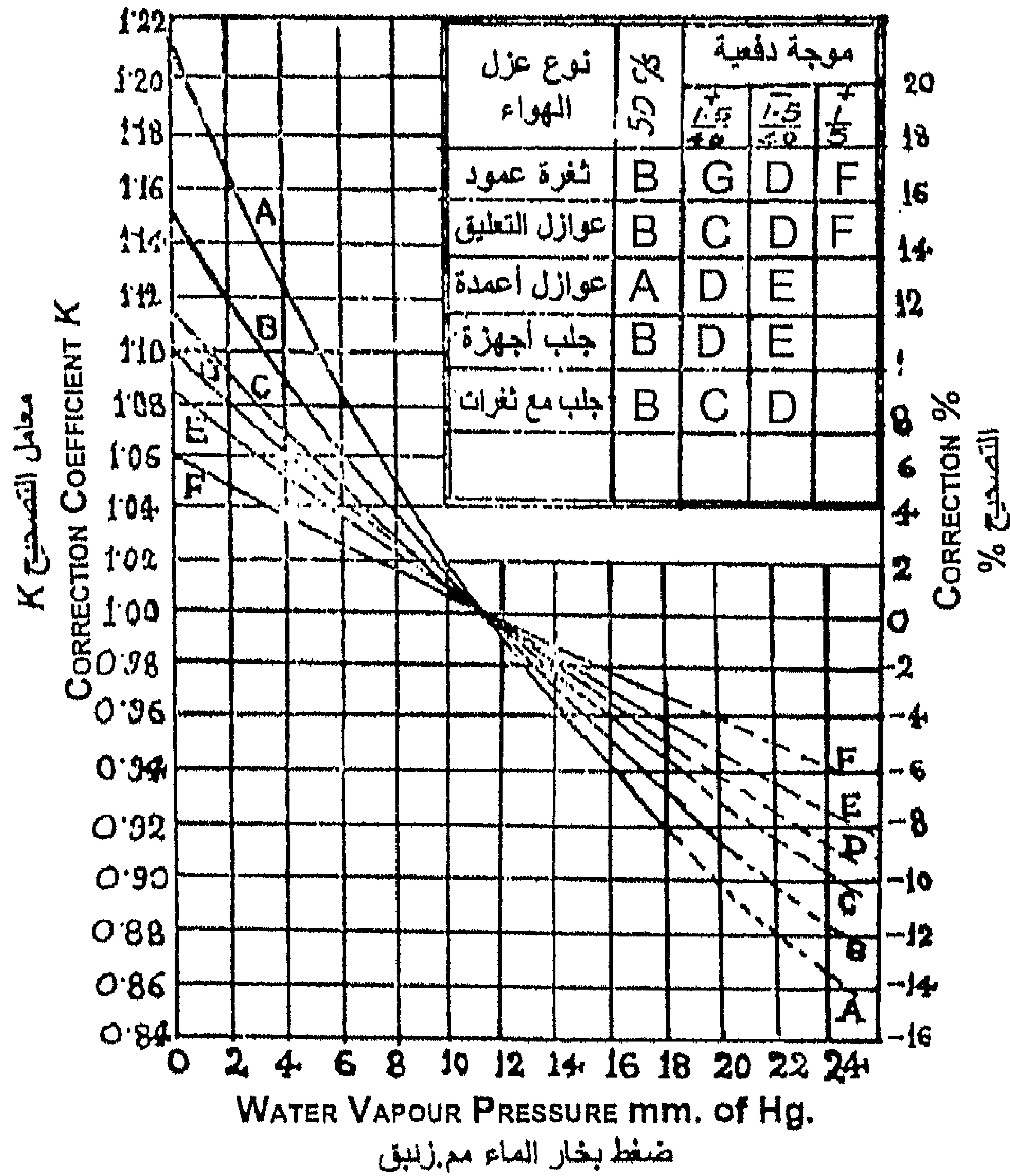
$$0.06\frac{5}{10} = 0.03$$

$$k = 1.03$$

بالنسبة لجلب الأجهزة، بعيداً عن خصائص التفريغ، فإن جهود الاختبار عند ترددات القدرة والنبضات التي يجب أن تقاومها العازلات بدون شرر أو تدمير يتم إنشاؤها أيضاً. العازل الجاف يجب أن يقاوم جهد الاختبار لتردد القدرة المصحح للشروط الجوية لدقيقة واحدة.

الاختبار النبضي ينفذ عند موجات قياسية كاملة ومشطورة عند 2 µ sec. [الشطر ينفذ بواسطة ثغرة كرة]. يجب أن يقاوم العازل الموجة القياسية ثلاث مرات وبعد ذلك موجة الجهد المشطور أيضاً ثلاث مرات.

الجهود النبضية للاختبار وأيضاً جهود تردد القدرة يجب أن تصحح طبقاً للمعادلة (4.1) مع تأكيد الشروط الجوية.



الشكل 4.1: منحنيات تحديد تصحيح رطوبة الهواء

٤-٢ الخصائص الميكانيكية Mechanical Characteristics

مطالب المتانة الميكانيكية للعازلات تُحدد بالشروط التي تعمل تحتها في الميدان.

فالعازلات التي تُستخدم لعزل موصلات خطوط النقل الكهربية تواجه الأحمال الناتجة بواسطة الشد ووزن الموصلات. وتعتمد هذه الأحمال على مساحة مقطع الموصل وطول المسافة بين الدعائم. إلى جانب ذلك، فإن درجة الحرارة وقوة الرياح وتواجد ثلوج منزلقة تؤثر على هذه القيم. عوازل الخط من الطراز المسماري pin type فإن هذه الأحمال تكون أساساً أحمال حناية [انحناء] bending loads. عوازل التعليق وبسبب توصيلاتها المفصلية التعليق تتعرض لقوى شد فقط.

عوازل الأعمدة والمداخل [جلب] في تركيبات التوزيع والأجهزة تتعرض لقوى حناية، الأحمال المشروطة بالقوى الكهروديناميكية أثناء دوائر القصر في المعدات، القوى الميكانيكية أثناء عمل العوازل وبالمثل شد الموصلات الناشئ من قوى الرياح.

بالنسبة للجلب، العوازل، عوازل الخط المسمارية، فإن المتانة تحت الحناية يكون قياسياً، وبالنسبة لعوازل الشد فإن المتانة تحت الشد تكون قياسية أيضاً.

الخصائص الميكانيكية الأساسية للعوازل تكون هي المتانة الميكانيكية المضمونة تحت الحناية أو الانفعال strain، أي الحمل الأدنى المدمر المحدد أثناء الزيادة التدريجية للحمل حتى التدمير المرئي للعازل.

ومع ذلك، فإن القوة الهدامة لا تعطي فكرة كاملة عن قدرة العوازل على مقاومة القوى الميكانيكية.

وبالنسبة لعوازل التعليق فإن تدمير العازل الكهربي تحت الغطاء المعدني -غير المرئي للعامل الذي يجري الاختبارات- يسبق التدمير الكامل. لذلك، فإن عوازل التعليق تختبر كهروميكانيكياً. وفي نفس الوقت مع الأحمال الميكانيكية المتزايدة تدريجياً، نؤثر بجهد كهربي يتكون من %(80–70) من قيمة جهد الشرر الجاف على العازل. التدمير الميكانيكي للعازل الكهربي تحت الغطاء يكتشف الآن من الانهيار الكهربي للعازل. قيمة الحمل الميكانيكي الذي يدمر العازل أثناء هذه الاختبارات يسمى "المتانة الكهروميكانيكية" للعازل.

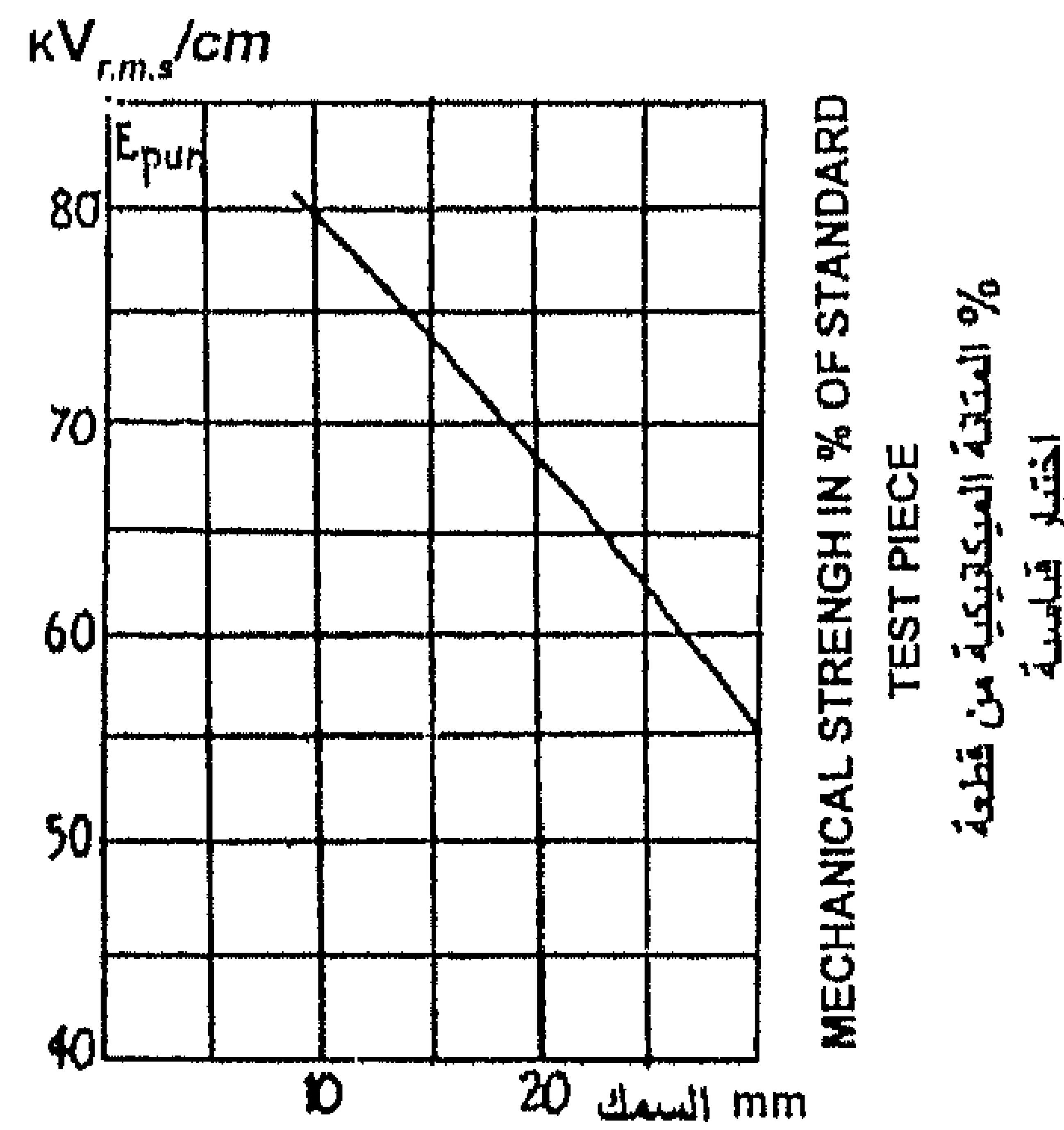
الخاصية الميكانيكية الرئيسية لعوازل التعليق المشغلة هي حمل الاختبار لساعة واحدة، ويعطى عادة على طبعه عازل التعليق. حمل اختبار الساعة الواحدة يشكل تقريباً 75% من المتانة الكهروميكانيكية. وينفذ الاختبار آنياً مع التأثير بجهد يساوي %(80–75) من قيمة جهد الشرر الجاف. ويجب أن يقاوم العازل هذا الاختبار بدون تدمير لفترة زمنية مقدارها ساعة واحدة. وحسب المقبول عملياً فإن أقصى أحمال مسموحة [بالتشغيل] على عوازل التعليق تكون نصف حمل اختبار الساعة الواحدة.

٤-٣ مواد العازلات [العوازل] Materials of Insulators

تعتمد صناعة العازل وخواصه الكهربية والميكانيكية -إلى حد ما- على المواد المستخدمة في صناعته.

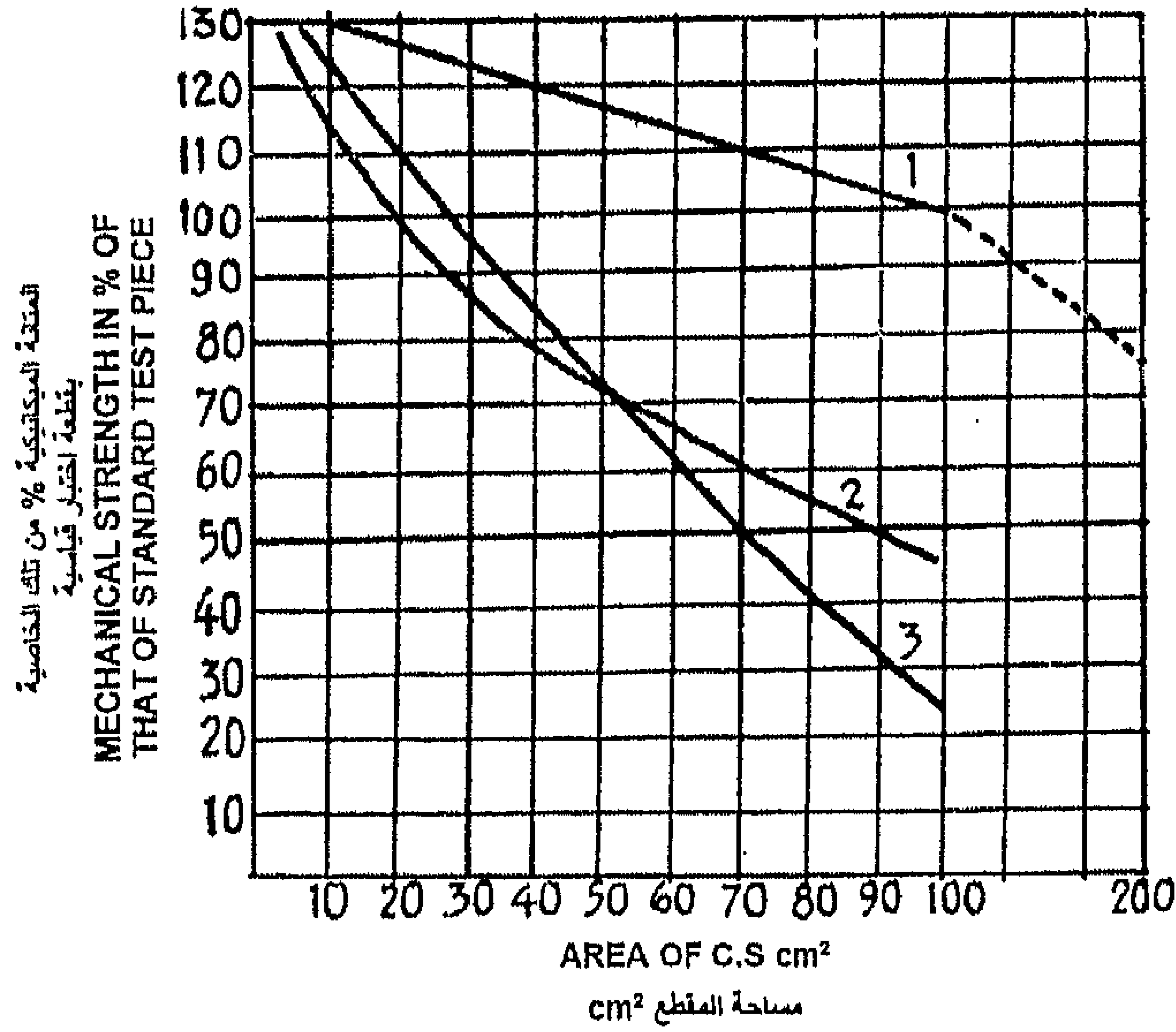
تتكون العازلات من تركيبات من مواد عازلة كهربياً ومعدنية تستخدم لتثبيتهم ميكانيكياً ومواد تربط التركيبات مع العازل الكهربي.

المواد العازلة كهربياً والتي تُجهز منها العازلات يكون لها متانة كهربية عالية ضد التثقب، متانة ميكانيكية كافية ويجب أن تقاوم جيداً التأثيرات الجوية الضارة. البورسلين الكهروميكانيكي المستخدم على نطاق واسع كمادة عازلة كهربياً لإعداد العازلات يحقق كل هذه المطالب. المتانة الكهربية للبورسلين في مجال منتظم لقطعة اختبار سمكها 1.5 mm هي $kV_{r.m.s}$/mm (22–28). وبزيادة سمك البورسلين ينخفض متوسط الميل للتثقب له. في هذه العازلات يكون المجال غير منتظم. لذلك، يظل متوسط المتانة الكهربية للبورسلين أصغر. في الشكل 4.2 معطى متوسط المتانة الكهربية للبورسلين في مجال غير منتظم عند جهد متردد كدالة في سمك قطعة الاختبار. وعند جهود دفعية تكون المتانة الكهربية هي %(70–50) أعلى من تلك التي في حالة تردد القدرة.



الشكل 4.2: متانة العزل الكهربي المحسوبة للبورسلين في مجال غير منتظم عند 50 c/s جهد متردد

وتعتمد المتانة الميكانيكية للبورسلين على نوع التشوه. ويعمل البورسلين جيداً تحت الانضغاط وأسوأ تحت تأثير قوى الحناية bending وخصوصاً تحت الشد. مقاومة قطعة اختبار قياسية مطلية بطبقة زجاجية قطرها cm (3–2) تساوي $4500\ kg/cm^2$ تحت الانضغاط، وتحت الحناية والشد تكون أقل [$700\ kg/cm^2$ ، $300\ kg/cm^2$ على الترتيب]. المتانة الميكانيكية للبورسلين في عازل تعتمد على تكوين التركيبات، طرق توصيلها مع البورسلين وتنخفض دائماً مع زيادة مساحة مقطع البورسلين. أثناء الانضغاط يكون الانخفاض في المتانة الكهربية أصغر منه أثناء الحناية والشد [الشكل 4.3].



الشكل 4.3: تغير المتانة الميكانيكية للبورسلين مع مساحة المقطع. (1) انضغاط؛ (2) شد؛ (3) حناية (انحناء)

سمك جدران البورسلين في العوازل لا يتعدى عادة cm (40–30). وإذا حدث وكان هذا السمك غير كافي بالنسبة للمتانة الكهربية والميكانيكية، تستخدم إنشاءات مؤلفة composite. في العوازل الاسطوانية فقط حيث يكون تثقيب البورسلين غير ممكن يكون مسموحاً بسمك أكبر للبورسلين. في عوازل المداخل [الجلب] يصنع غطاء خارجي فقط من البورسلين. زيت المحولات، الورق، الكتل العازلة التي تُحمى من التأثيرات الجوية بواسطة البورسلين تستخدم للعزل الداخلي لهذه العازلات.

حديثاً أُستخدم الزجاج لإعداد العازلات من الطراز المسماري والقرصي. عازلات الزجاج تكون أرخص من البورسلين، بالإضافة إلى ذلك، فهي لا تتخلف وراء الأخيرة بالنسبة للخصائص الكهربية والميكانيكية. وتعتمد هذه الخصائص –إلى حد معقول– على التركيب الكيميائي للزجاج، وخاصة على محتواه القاعدي [القلوي]. فوجود قلويات مُذابة في تركيب الزجاج يزيد من استرطابية hygroscopicity سطح العازل –وبالتالي– يزيد من موصلية سطحه أيضاً. وكنتيجة فإن الخواص الكهربية للعوازل من الزجاج القلوي تكون أسوأ من العوازل الزجاج التي لها محتوى قلوي صغير أو من البورسلين. متانة التثقب الكهربي للزجاج القلوي هي $17.9\ kV_{r.m.s}/mm$، والزجاج الذي محتواه القلوي صغير له متانة $48\ kV_{r.m.s}/mm$ أي أكبر مرتين من البورسلين.

صغة الأيون للتوصيلية الكهربية للزجاج المحتوي قلوي كبير تؤدي إلى التحليل الكهربي للزجاج أثناء عمله تحت جهد. ومع ذلك، فإن العوازل المصنوعة من زجاج قلوي لا يمكن استخدامها في تركيبات الجهد d.c. عند الجهد a.c يكون التحليل الكهربي غائباً عملياً ويحدث التقدم في عمر العازلات ببطء أكثر.

المتانة الميكانيكية لقطع الاختبار من الزجاج المُلّدن anncaled glass تكون أكبر من تلك الخاصة بالبورسلين، حيث إن الشد الميكانيكي الداخلي يكون من السهل نسبياً إزالته أثناء التلدن. في البورسلين يبقى الشد الداخلي دائماً وذلك يُخفض من متانته. الزجاج القلوي يمتلك معامل درجة حرارة للتمدد عالياً –لذلك– فإن العوازل من هذا الزجاج تُدمر تحت تأثير التغيرات الحادة لدرجة الحرارة أثناء استخدامها في التشغيل. وهذا يُحد من مجالات تطبيقاتها في التركيبات الداخلية التي لا تتعرض لتغيرات حادة في درجة الحرارة.

وتجهز العوازل للتركيبات الخارجية من زجاج ذات محتوى قلوي صغير متبوع بالتلدن. ويستخدم الزجاج القلوي فقط عندما تتعرض العوازل إلى تصليد hardening والذي يمنحها متانة ميكانيكية عالية.

أثناء التصليد، يسخن الزجاج إلى درجة حرارة عالية [650°C للزجاج القلوي، 780°C لزجاج المحتوى القلوي الصغير]، بعد ذلك ينفخ هواء بارد من خلاله. أثناء ذلك تصبح الطبقات الخارجية للزجاج صلدة والداخلية تستمر في الانخفاض في الحجم أثناء التبريد. الطبقات الخارجية من الزجاج –أثناء هذه العملية– تتعرض لقوى الانضغاط أما الداخلية فتتعرض لقوى الشد. وإذا أثر حمل ممتد على مثل هذا العازل يبدأ الهدم فقط عندما يتم التغلب على قوى الانضغاط في الطبقات الخارجية أو تُعَادل. ونتيجة لذلك فإن متانة العازل المصلد تكون أكبر من العازل المُلدن.

العوازل المتصلدة من الزجاج صغير المحتوى القلوي تقاوم الأحمال الديناميكية جيداً، وتكون قادرة على تحمل الصدمات والسقوط من ارتفاع عالي. ومع ذلك، فهذه العوازل تكون مكلفة ولذا تستخدم فقط في تلك الحالات عندما يكون مطلوب متانة ميكانيكية عالية جداً واستقرار حراري.

في الجدول 4.1 موضح الخواص الكهربية والميكانيكية لمواد عازلة كهربياً تستخدم في تجهيز وإعداد العوازل من البورسلين، الزجاج الملدن وأنابيب الورق المُبكلت.

الجدول 4.1: الخواص الكهربية والميكانيكية لمواد عازلة كهربياً تستخدم للعوازل

الخواص	العوازل الكهربية			
	بورسلين	زجاج		أنابيب ورق مبكلت
		محتوى قاعدي صغير	قاعدي	
جهد تثقب عينة الاختبار $(kV_{r.m.s}/mm)$	22–28	48	17.9	10–15
منفذية العازل الكهربي ε	5.5–7	5.5	10	4.5
$tan\ \delta$ عند درجة حرارة 22°C	(2–4)%	(2–3)%	(6–7)%	6%
مقاومة السطح النوعية عند رطوبة 65% (Ω)	3×10^{13}	4×10^{14}	1.5×10^{12}	10^{10}
مقاومة الحجم النوعية عند 20°C (Ω.cm)	10^{13}	4.5×10^{14}	4×10^{12}	10^{12}
معامل التمدد الحراري الخطي	4×10^{-6}	5×10^{-6}	9×10^{-6}	–
المقاومة (kg/cm^2):				
▪ في الانضغاط	4500	7000	7000	400
▪ في الحناية	700	6500 [المصلد حتى 2500]	–	–
▪ في الشد	300	600	600	500

يمكن أن تصنع عوازل العمود والداخل من الورق المبكلت. عند درجات الحرارة العالية يغطى الورق بورنيش مبكلت ويلف ليشكل أنبوبة. وبعد اللف تتعرض العوازل لعاملات حرارية، ونتيجة لذلك يمر البكاليت إلى شرط بحيث يُصبح غير قابل للذوبان ولا يصبح طري تحت تأثير الحرارة. ويورنش سطح العازل. عوازل ورق–البكاليت المعدة بهذا الشكل يكون لها متانة كهربية وميكانيكية عالية [الجدول 4.1].

وتصنع تركيبات العوازل من الحديد الزهر cast iron أو من الصلب steel، وعند التيارات العالية، ولكي نتجنب تسخينها غير العادي بسبب المغنطيسية الزائدة، يستخدم حديد زهر غير مغنطيسي أو معادن بيضاء [معادن مضادة للاحتكاك].

بناء التركيبات وطرق ربطها وتوصيلها مع العازل الكهربي تؤثر على المتانة الميكانيكية للعوازل لأن التركيبات تنقل الإجهادات الخارجية إلى العازل الكهربي، وتسبب توزيع الشد الميكانيكي فيهم. التركيبات في معظم الأحوال تركب مع العازل الكهربي بواسطة أسمنت بورتلاندي. وتستخدم أيضاً تثبيت ميكانيكي بدون وصلات أسمنتية.



عوازل الخط

Line Insulators

٥-١ العوازل المسمارية Pin Insulators

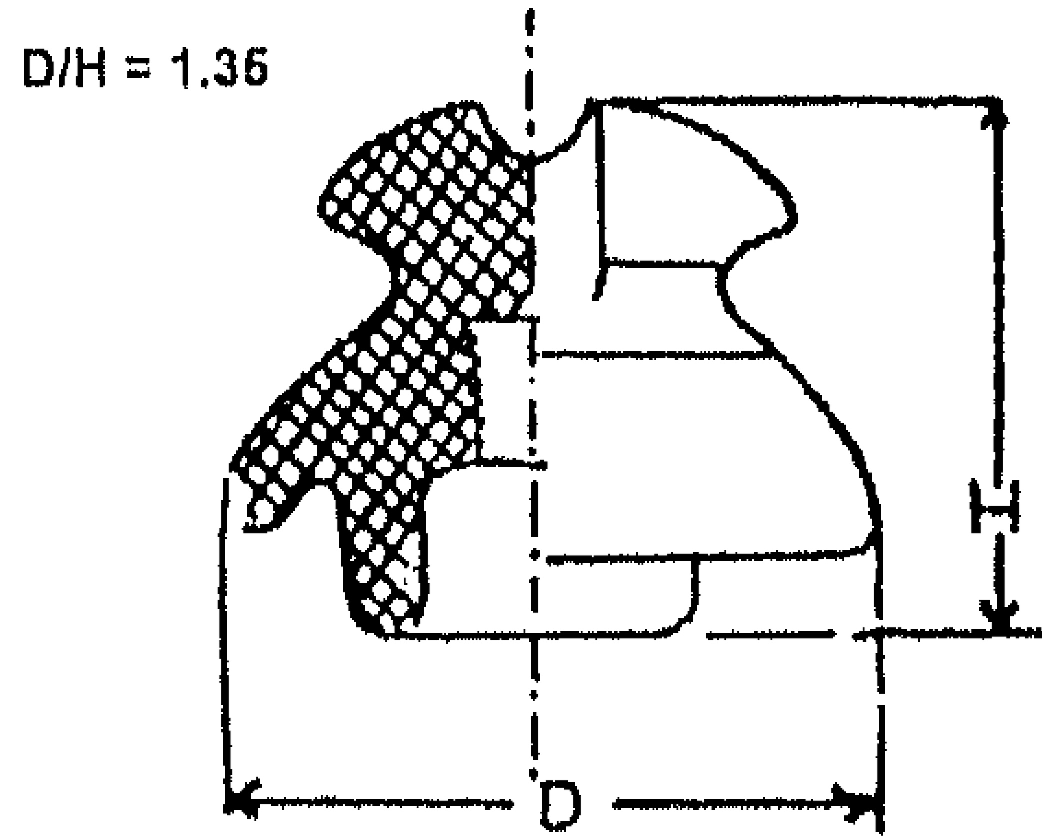
لعزل الخطوط منخفضة الجهد [حتى 100 Volts] تستخدم العوازل الأكثر بساطة المسماة بـ"العوازل التليغرافية" [نوع $T\phi$، TC]. وعند جهد خط kV (10–3) تكون المتانة الكهربية لهذه العوازل غير كافية. وعلى هذه الخطوط تستخدم العوازل المسمارية التي تتميز بأبعاد متزايدة وأشكال أكثر تعقيداً.

العوازل المسمارية لخطوط 35 kV –لكي نضمن المتانة الكهربية الضرورية– يجب أن يكون لها قطر وارتفاع جديران بالاعتبار. وحيث إن خصائص البورسلين تتدهور بحدة في أي زيادة في سمك جدرانها فإن مثل هذه العوازل تصنع عادة مركبة من (3–2) جزء من البورسلين ذات السمك الأصغر. وللخطوط ذات الجهود الاسمية الأعلى لا تستخدم العوازل المسمارية حيث ستكون كبيرة الحجم وأقل تحملاً بسبب قوى الانحناء الكبيرة التي تؤثر عليهم.

ولعزل الخطوط 35 kV الهامة وخطوط الجهود الأعلى، تستخدم عوازل تعليق من الطراز القرصي. بمساعدة توصيلات مفصلية للتعليق يمكن الحصول على سلاسل تعليق عازلة لأي جهد. وعلى النقيض للعوازل المسمارية، فإن الحمل الميكانيكي الناتج بواسطة شد الموصلات في عوازل التعليق يكون موجهاً ليس عمودياً ولكن بطول المحور ولا ينتج إجهادات انحناء. وتعمل عوازل السلسلة في شد. ومع ذلك، فإن تركيب هذه العوازل يكون بحيث يعطي الحمل الخارجي رفع لقوى الانضغاط والقص في العازل الكهربي [بورسلين أو زجاج]. وبهذه الطريقة، تستخدم متانة عالية جداً للبورسلين أو الزجاج في الانضغاط.

ولعزل الخطوط 110 kV ، 220 kV، يستخدم على نطاق واسع عوازل التعليق الاسطوانية في بعض الدول. ويعمل البورسلين في هذه العوازل في انضغاط. وللحصول على متانة ميكانيكية عالية فإن قطر العازل الاسطواني يكون mm (60–125)، البورسلين عالي الجودة من هذه الأقطار يمكن الحصول عليه فقط بمساعدة تقنيات الإنتاج الحديثة.

ويوضح الشكل 5.1 العازل طراز C ш المستخدم على نطاق واسع لعزل خطوط kV (6–10). ويثبت الموصل بنتوء على قمة أو جانب العازل بمساعدة انحناء السلك أو طرف خاص. وللتركيب على الدعامة يولولب [يوقلوظ] العازل على المسمار المعدني أو يثبت بخطاف بمساعدة قاطرة. وحتى لا يلتوي الخطاف في الدعامة تحت شد الموصل فإنه يعطى شكل بحيث يكون محور الموصل ومحور جزء الخطاف الملولب في الدعامة يقعان في نفس المستوى.



الشكل 5.1: العازل المسماري طراز C ш لـ kV (6–10)

وبهذه الطريقة لا ينتج شد الموصل عزم إدارة بالنسبة لمحور الخطاف.

التجويف الملولب لإدخال المسمار أو الخطاف يتم بعمق في جسم العازل بحيث يكون الجزء العلوي من المسمار أو الخطاف عند نفس مستوى النتوء الخارجي الخاص بتركيب الموصل. وبذلك يتم تحقيق خفض في عزم الانحناء الناشئ بواسطة شد الموصل.

متانة تثقيب العازل [المحسوبة في الزيت] تكون أكبر بـ %(30–40) من جهد الشرر الجاف. وتحت ظروف الأمطار يصبح الجزء الخارجي من العازل مبللاً تماماً. ويبقى الجزء السفلي فقط من العازل جافاً. ولذلك فغالباً ما تؤثر كل الجهود بين نهاية الحافة الخارجية والمسمار، وكنتيجة فبالرغم من الزيادة الملحوظة في قطر العازل مقارنة بارتفاعه $D/H = 1.35$ فإن جهد الشرر المبلل للعازل يكون نصف جهد الشرر الجاف [الجدول 5.1].

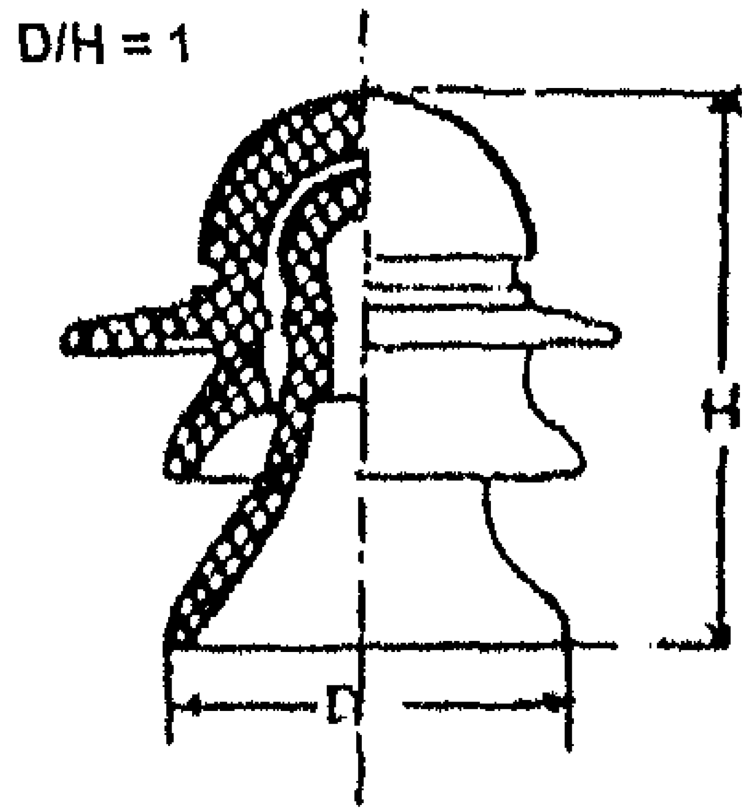
الخواص الكهربية والميكانيكية لعازلات الزجاج اللدن طراز C ш، والمطور يكون أفضل إلى حد ما من عازلات البورسلين عند نفس الأبعاد الهندسية تقريباً.

Д ш هو طراز آخر من العازل المسماري حيث توجد تعرجات [تموجات] على جوانب السطح لتجنب البلل الكامل بواسطة الأمطار [الشكل 5.2]. وهذه العازلات لها جهد شرر مبلل أعلى عند قطر عازل أصغر نسبياً $D/H = 1$.

الجدول 5.1: خصائص عوازل الخط من الطراز المسماري

طراز العازل	الأبعاد H (mm)	الأبعاد D (mm)	المتانة الميكانيكية المضمونة تحت انحناء (kg)	جهد الشرر عند 50 c/s ، $kV_{r.m.s}$ شرر جاف	جهد الشرر عند 50 c/s ، $kV_{r.m.s}$ شرر مبلل	جهد الشرر عند نبض 1.5/40 KV_{max} عند 2 µ sec.	جهد الشرر عند نبض 1.5/40 KV_{max} 50%
ш С-6	94	126	1400	50	28	109	83
ш С-6 زجاج	91	126	1800	50	28	–	–
ш Д-6	108	100	1300	52	30	108	75
ш С-10	110	147	1400	60	34	130	101
ш С-10 زجاج	110	150	1800	60	36	–	–
ш Д-10	125	112	1900	62.5	38	117	90
ш Д-20	190	185	3500	68	64	170	132
ш Д-35	270	250	6000	129	95	270	179

العــازل ШД 35 kV يجمــع مــن جــزئين مــن البورسلين مربوطين بمحلـول أسمـنتي. الجـدول 5.1 يعطـــي الأبعـــاد الهندســـية والخـــواص الكهربيـــة والميكانيكية للطرازين ШС، ШД.



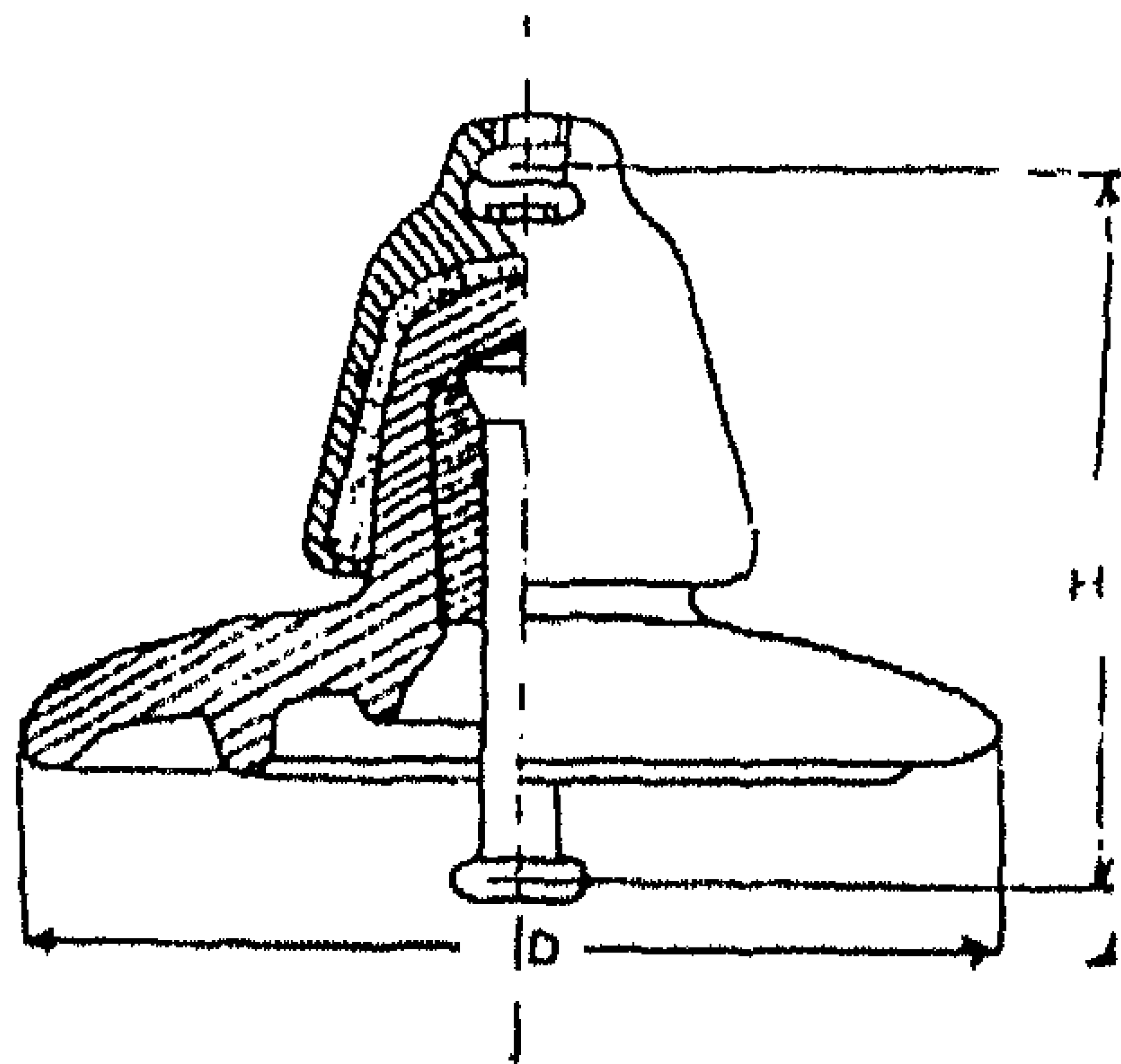
الـشكل 5.2: عــازل مــسماري طــراز ШД لـ 35 kV

العوازل طراز ШД لها شكل أكثر تعقيداً مقارنة بعـوازل طـراز ШС، وهـي أقـل ملائمـة في التـصنيع حيـث تتطلـب خراطـة. لـذلك فـإن هـذه العـوازل تستخدم أساساً لعزل خطوط kV (20–35).

٥-٢ عوازل التعليق Suspension Insulator

٥-٢-١ العوازل طراز القرص Insulators of Disc Type

طراز القرص من العوازل هو الطراز الرئيـسي لعـوازل التعليق المستخدمة في روسـيا. قـرص البورسـلين [أو الزجـاج] يـشكل قاعـدة أو أسـاس العـازل [الـشكل 5.3]. الجزء المركزي للقرص المنحني في اتجاه القمة يـسمى "رأس العـازل". ويثبـت غطـاء مـصنوع مـن حديد زهر مطيل ductile cast iron بـرأس العـازل. في القابس الموضوع داخـل رأس العـازل يُـدفن عمـود من الصلب. تقوية العازل أي، التوصـيل الميكـانيكي للعازل الكهربي مع التركيبات المعدنية [مـع الغطـاء والعمود] تنفذ بمساعدة مادة رابطة تستخدم أسمنـت بورتلاندي مع الرمل بنسبة 1:2.



الشكل 5.3: عازل تعليق مع رأس مخروطية

توصل العوازل في سلسلة بإدخال الرأس السميكة للعمود في أذن خاصـة في رأس عـازل آخـر وتثبيتها في مكانها بواسطة مسمار خاص.

رأس العازل وخاصة أجزاءه التي علـى الجوانـب تتحمـل الحمـل الميكـانيكي. لـذلكن فـإن تركيبات عوازل التعليق المستخدمة تختلف عن بعضها بواسطة شكل الرأس، ويهـدف اختيارهـا لضمان التخفيض في القوى المضافة في جسم البورسلين.

العوازل ذو الرأس المخروطي [الشكل 5.3] تستخدم على نطاق واسع في روسيا. الأسطح الداعمة لهذا العازل لها شكل مخروطي. أسطح الرأس من الداخل والخارج يكون مطلية بطبقة زجاجية ناعمة. والأسمنت لا يلتصق بتلك الأسطح، لذلك توجد إمكانية للحركة النسبية للأسمنت والبورسلين.

أثناء التأثير بقوة شد على العمود وأذن الغطاء فإن الجسم الأسمنتي ذو الشكل المخروطي الموضوع في قابس رأس العازل سينتقل بطول محور العازل وسيخلق قوى أسفينية في رأس العازل. أيضاً من الجانب الخارجي فإن رأس العازل لها شكل مخروطي مماثل، لذلك فإن الجدران الجانبية للرأس ستتعرض لإجهادات ضاغطة.

الأسمنت له معامل تمدد درجة حرارة أكبر من البورسلين، لذلك فإن التغيرات في درجة الحرارة ستؤدي أيضاً إلى إزاحة جسم الأسمنت بالنسبة لقابس العازل. ويمكن القول أنه إذا لم تكن الزاوية المخروطية لرأس العازل مختارة كبيرة بدرجة كافية، فإنه يمكن أن تنتج إجهادات إضافية خطيرة في بورسلين العازل. وكحقيقة، إذا ارتفعت درجة الحرارة بعد انخفاضها –عند زاوية مخروط صغيرة– فإن جسم الأسمنت لا يستطيع أن يرجع إلى موقعه السابق وسينتج قوة أسفينية إضافية. وأظهرت التجربة أن هذه الظاهرة لا تحدث إذا كانت زاوية المخروط [الزاوية بين محور العازل والجدران الجانبية لرأسه] ليست أقل من °(13–10).

عمود الصلب للعازل مغلظ [أكثر سمكاً] عند طرفه الخارجي لكي يوصل مع غطاء عازل آخر لتكوين السلسلة. وعند الطرف الآخر للعمود الصلب المدفون في قابس العازل يوجد سمك زائد ذو شكل مخروطي مع زاوية مخروطية °45 . ويحفظ طول العمود أدنى –ولكنهم كلهم متساوون– وبذلك نضمن تجميع سهل في السلسلة.

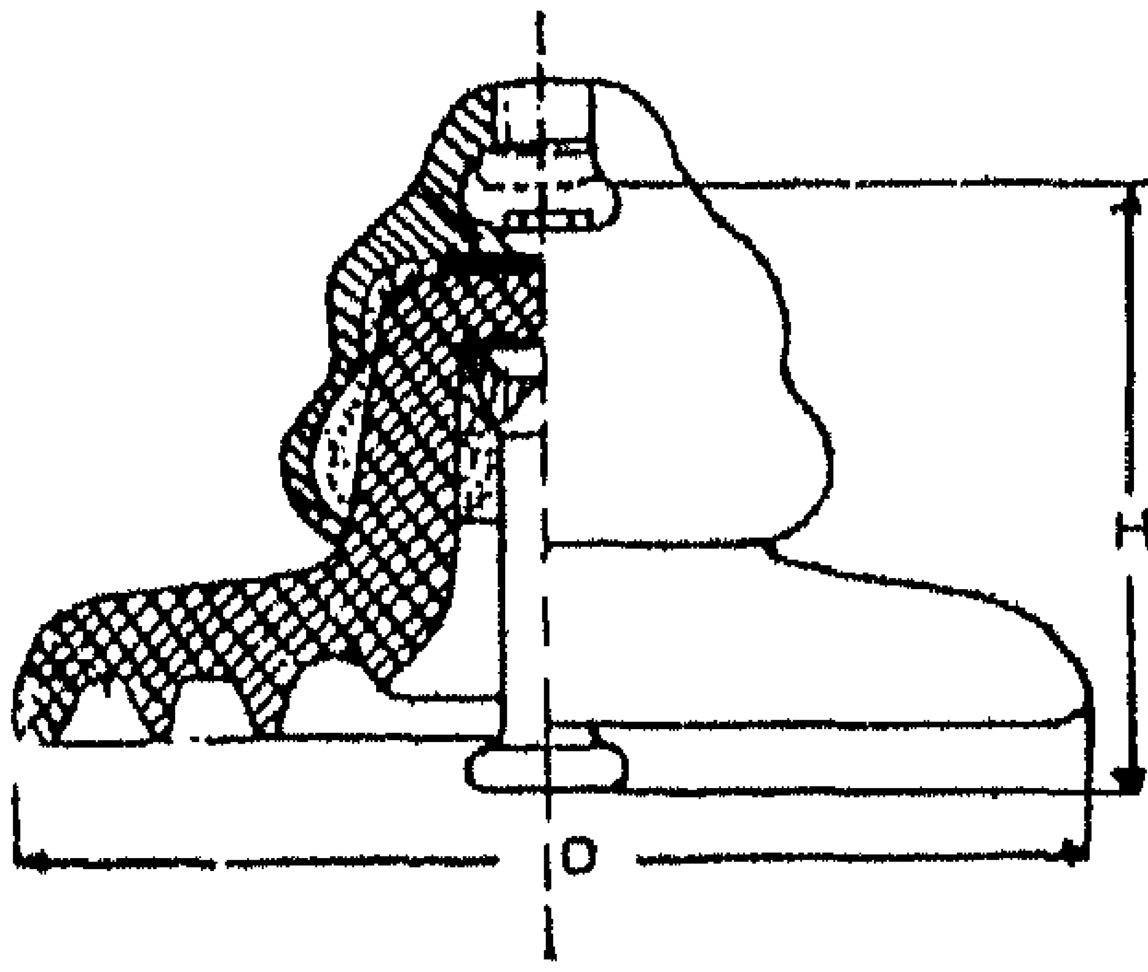
يكرر غطاء العازل الخط المحيطي لرأس العازل، وأبعاده تضمن سمك طبقة أسمنت mm (3–2). الجزء السفلي من غطاء العازل مخروطي الشكل له مخروط عكسي أو شفة حتى لا يزاح الغطاء بعد تقويته بالأسمنت.

العيب الرئيسي للعوازل مخروطية الرأس هو الزاوية الكبيرة للرأس وبالتالي، الأبعاد الكبيرة لرأس العازل والتي تؤثر بالسلب على خصائص تفريغ السلاسل من هذه العوازل.

هذا العيب غير موجود في عازل من طراز آخر منتشر في روسيا على نطاق أقل، وهو ما يسمى "العوازل ذات الرؤوس الاسطوانية". رأس هذه العوازل لها غالباً رأس اسطواني [الشكل 5.4]. رأس العازل تتزايد قليلاً في اتجاه قاعه لتسهيل كبس العوازل. عوازل هذا النوع

تقوى بمساعدة أسمنت بورتلاندي. ومع ذلك، ولكي نضمن تماسك دائم للأسمنت مع سطح البورسلين، تغطى الأسطح الجانبية لرأس العازل بفتات البورسلين التي تلتحم مع البورسلين بشكل دائم أثناء الخبز. في هذا الحالة، يُنقل الحمل إلى البروسلين فقط عند هذه القطاعات حيث توجد الفتات. وحيث لا توجد فتات على سطح البورسلين، ينزلق الأسمنت بسهولة ولا تنقل القوى إلى البورسلين. ولتعويض الإجهادات الميكانيكية التي يمكن أن تنتج بسبب معاملات درجة الحرارة غير المتساوية لتمدد الأسمنت والبورسلين، تغطى أسطحهم بالبيتومين. ولتخفيض الإجهادات الميكانيكية قريباً من الجزء العلوي للعمود، تصنع جديلة في رأس العمود [الشكل 5.4] وبذلك تصبح حافة العمود مرنة.

إذا كان شكل الجزء السفلي لغطاء العازل ذو الرأس المخروطية ليس له أهمية فإنه في العازل ذو الرأس الاسطواني يكون الغطاء في جزئه السفلي له خط محيطي محدد بالكامل. السطح الداعم الداخلي للغطاء يصنع شبه مخروطي مع نفس زاوية المخروط للسطح الداعم للعمود 30° . ويقوى العمود والغطاء بحيث تكون الأعمدة المرسومة من حواف سطح العمود تنطبق مع الأعمدة المرسومة من حواف السطح الداعم للغطاء. غطاء فتات البورسلين يكون له نفس الارتفاع عند السطح الجانبي الداخلي والخارجي للرأس، حواف الغطاء يجب أن تكون في مستوى أفقي واحد.



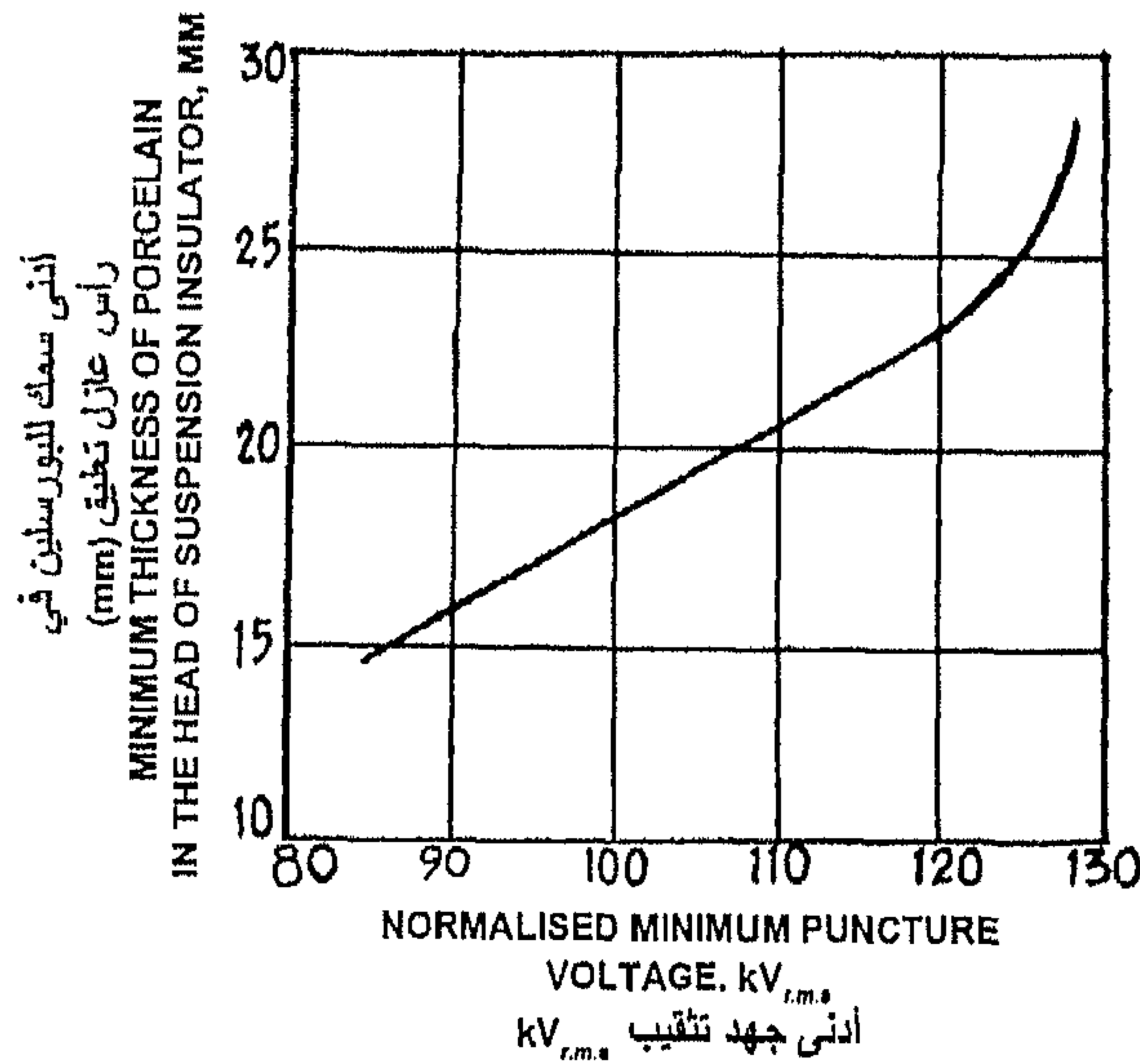
الشكل 5.4: عازل تعليق ذو رأس اسطواني

إذا اندمجت النقاط السابق مناقشتها، فإن العوازل اسطوانية الرأس والتي لها نفس الخواص الكهربية والميكانيكية يكون لها أبعاد وأوزان أصغر من العوازل مخروطية الرأس. ومع ذلك، فإن العوازل اسطوانية الرأس لها عيب هام يتكون من ضرورة توافر الملاحظة الدقيقة للعملية التكنولوجية –وعلى الأخص– تقوية عمود وغطاء العازل.

الأبعاد والخطوط المحيطية لأجزاء بورسلين القرص التي تحدد الخصائص الكهربية والميكانيكية للعازل تكون متماثلة للعازل ذو الرأس المخروطي والاسطواني. قبل كل شيء، فإن المطلب الخاص بأنه أثناء زيادة ممكنة في الجهد على العازل، سيحدث تفريغ على سطحه ولا يحدث تثقب للبورسلين في رأسه يجب أن يؤخذ في الاعتبار. فمن خبرة التشغيل، ثبت أنه

بالنسبة لذلك يجب ألا تقل العلاقة بين جهد التثقب وجهد الشرر الجاف عن 1.5. وتعتمد متانة التثقب على سمك البورسلين في رأس العازل. المنحنى في الشكل 5.5 يوضح أن سمك البورسلين في الرأس يجب أن لا يزيد عن mm (30–25) والذي يقابل جهد تثقب أدنى في حدود $125\ kV_{r.m.s}$ واستخدام بورسلين ذو سمك كبير يكون غير مرغوب حيث إن جهد التثقب يزداد قليلاً جداً مع الزيادة في سمك البورسلين.

أبعاد قرص من العازل تضمن جهد شرر جاف في حدود $75\ kV_{r.m.s}$. ويجب ملاحظة أن قيمة جهد الشرر لعازل ليس له أي تأثير على جهد شرر السلسلة الذي يعتمد على العلاقة بين مسافة تفريغ العازل في السلسلة وارتفاع العازل. مسألة تحديد هذه الأبعاد ستدرس بالتفصيل لاحقاً في البند ٦–٢ في الفصل التالي.



الشكل 5.5: علاقة سمك بورسلين رأس عازل قرص مع متانة التثقب القياسية

السطح الناعم العلوي للقرص يميل بزاوية °(10–5) على الأفقي لضمان تدفق المياه. حافة القرص منحنية لأسفل وتشكل ما يسمى "قطارة" والتي لا تسمح بالسريان المستمر للماء من سطح العازل العلوي إلى السفلي. السطح السفلي للعازل يكون مُعرجاً. وهذا يزيد من طول مسار التسرب بطول هذا السطح وجهد الشرر المبلل للعازل.

عدد وشكل التعرجات يعتمد على طريقة تسوية [حرق] عازلات البورسلين. يمكن وضع أي عازل للتسوية baking على السطح غير المدهون بطبقة زجاجية لرأسه. في هذه الحالة فإن

السطح السفلي الكامل للقرص يغطى بطبقة زجاجية [الشكل 5.4]. وطبقاً لطريقة أخرى، لتلدين التعرج الأوسط يصنع أطول من الآخرين [الشكل 5.3]. ويوضع العازل مع رأسه لأعلى للتسوية ويستند على هذه التعرجات. ومن الطبيعي أن تترك حافة التعرج الأوسط بدون تزجيج [الدهان بطبقة زجاجية].

زيادة أبعاد الضلع الأوسط في هذه الحالة يُحد من عدد الحواف إلى ثلاث بدلاً من أربع. ومع ذلك، فعملياً لا يؤثر على الخواص الكهربية للعازل. ومع اعتبار الخواص الميكانيكية، فإنها تكون أعلى، حيث إن الرأس المزجج تماماً لهذا العازل لا تتشوه أثناء التسوية.

ومع البورسلين، يستخدم حالياً الزجاج لتجهيز العوازل ذات الرؤوس المخروطية. تركيب العازل الزجاجي، شاملاً شكل القرص، يكون مماثل تماماً لعازل البورسلين. وتقاوم عوازل الزجاج المصلد مع أبعاد منخفضة ووزن أقل، هذه الأحمال الكهروميكانيكية الأكبر، لذلك فإنها تكون مخروطية مقارنة مع عوازل البورسلين.

أي تدمير للزجاج المصلد، شاملاً ذلك الذي تحت رأس العازل، يؤدي إلى تطاير القرص إلى قطع صغيرة –مع ذلك– يستمر في حمل الحمل الميكانيكي كما هو من قبل. هذا الظرف يبسط تشغيل خطوط النقل، حيث إن العوازل المعيبة يمكن أن تركب بدون أي اختبار مانع.

استخدام الزجاج كعازل كهربي يسمح بالتجهيز الكامل بالمعدات والآلية لعملية تصنيع العوازل. ولإنتاج العوازل من عدة طرازات، تم بناء خطوط أوتوماتية. وبسبب المميزات السابقة، ستجد العوازل الزجاجية دائماً مزيداً من التطبيقات.

الجدول 5.2 يوضح الأبعاد والخواص الأساسية الكهربية والميكانيكية لعوازل البورسلين من الطراز القرصي والعوازل من محتوى قلوي صغير، الزجاج الصلد.

٥-٢-٢ عوازل الطراز الاسطواني أو العمود Cylindrical or Rod Type Insulators

الشكل 5.6 يوضح عازل تعليق اسطواني وهو اسطوانة من البورسلين مع تعرجات تقوية عند الأطراف بواسطة غطائين معدنيين بمساعدة محلول أسمنتي. وللربط الدائم للأغطية مع البورسلين فإن أطراف العمود وبالمثل الأسطح الداعمة الداخلية للأغطية لها شكل مخروطي.

يتم اختيار قطر اسطوانة البورسلين حسب المتانة الميكانيكية المطلوبة، وأخذ الشد يساوي kg/cm^2 (130–140) لهذا السمك (ويجب ملاحظة أن اليابان استعملت مواد خام أخرى مختلفة وانتجت عوازل ذات متانة ميكانيكية عالية، الإجهادات المحسوبة في الشد للعوازل اليابانية هو kg/cm (230–250).

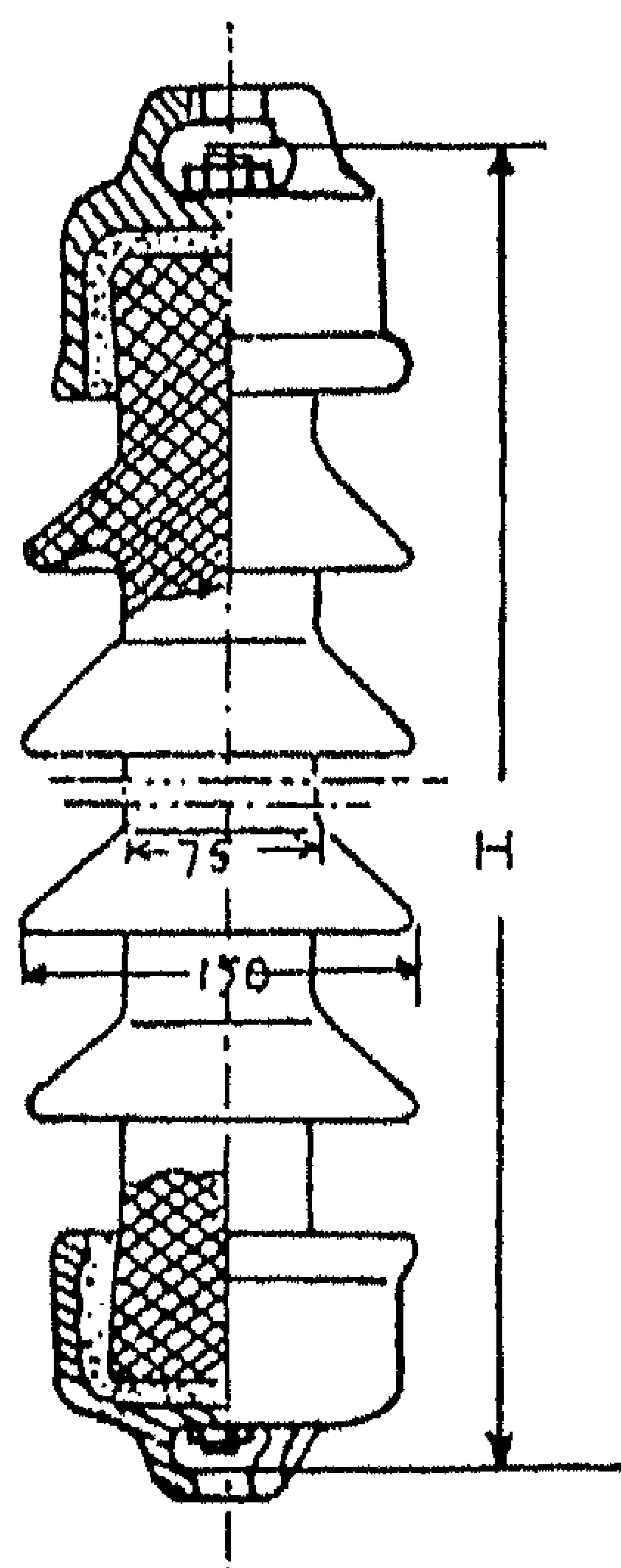
الجدول 5.2: خواص عوازل التعليق طراز القرص

طراز العازل	الأبعاد		الوزن (kg)	حمل اختبار الساعة الواحدة (T)	المتانة الكهروميكانيكية المضمونة (T)	متانة التثقب ($kV_{r.m.s}$)	جهد الشرر عند 50 c/s (kV)	
	H (mm)	D (mm)					شرر جاف	شرر مبلل
π-4, 5	170	270	6.4	4.5	7.0	110	75	40
πC-4, 5	120	255	4.0	4.5	9.0	135	75	40
π-8, 5	204	320	12.3	8.5	11.0	125		
πC-8, 5	160	270	5.5	8.5	11.0	135		
π-11	215	350	14.2	11.0	14.5	125		
πC-11	170	270	6.9	11.0	18.0	135		
πC-16	190	320	9.0	16.0	25.0	150		
πC-4, 5	130	255	3.9	4.5	7.0	87	62	40

استخدام العوازل الاسطوانية أدى إلى الاقتصاد في المعدن مقارنة بالعوازل طراز القرص وأيضاً وزن أقل للسلسلة. وهكذا، فمثلاً، وزن سلسلة عند 110 kV مكونة من سبعة عوازل طراز π-4, 5 يساوي 45 kg، ولكن العازل الاسطواني عند 110 kV ذات المتانة الميكانيكية نفسها وجهد الشرر يزن 23 kg . وزن التركيبات المعدنية في السلسلة للعازل من طراز π-4, 5 هو 15 kg، ولكن بالنسبة للعازل طراز العمود تزن التركيبات 3.5 kg.

العيب الرئيسي للعوازل الاسطوانية هو إمكانية التدمير الكامل بواسطة قوس كهربي أو أثناء التصادمات الميكانيكية الخارجية. وفي هذه الحالات لا يدمر العازل طراز قرص كقاعدة بالكامل. حتى مع تكوّن تشققات في الرأس فإن هذه العوازل لا تتحول إلى قطع ويمكن أن تحمل الحمل الميكانيكي فترة زمنية معقولة بالرغم من التدمير الكهربي.

الجدول 5.3 يوضح الخصائص الأساسية الكهربية والميكانيكية وأبعاد العوازل الاسطوانية السوفيتية واليابانية.



الشكل 5.6: عازل تعليق اسطواني للاستخدام عند 110 kV

الجدول 5.3: خصائص عوازل التعليق الاسطوانية

نوع العازل	الأبعاد			المتانة الميكانيكية المضمونة	جهد الشرر عند 50 c/s ($kV_{r.m.s}$)	
	H (mm)	قطر الاسطوانة (mm)	قطر الطبقة الخارجية (mm)	T	الجاف	المبلل
CT-110	1270	95	150	6	420	300
الياباني:						
CA-45022	525	60	120	7	150	120
CA-45024	1217	75	150	11	400	340
CA-45025	1305	85	160	13	400	340
CA-15429	1050	125	215	30	310	245

٦

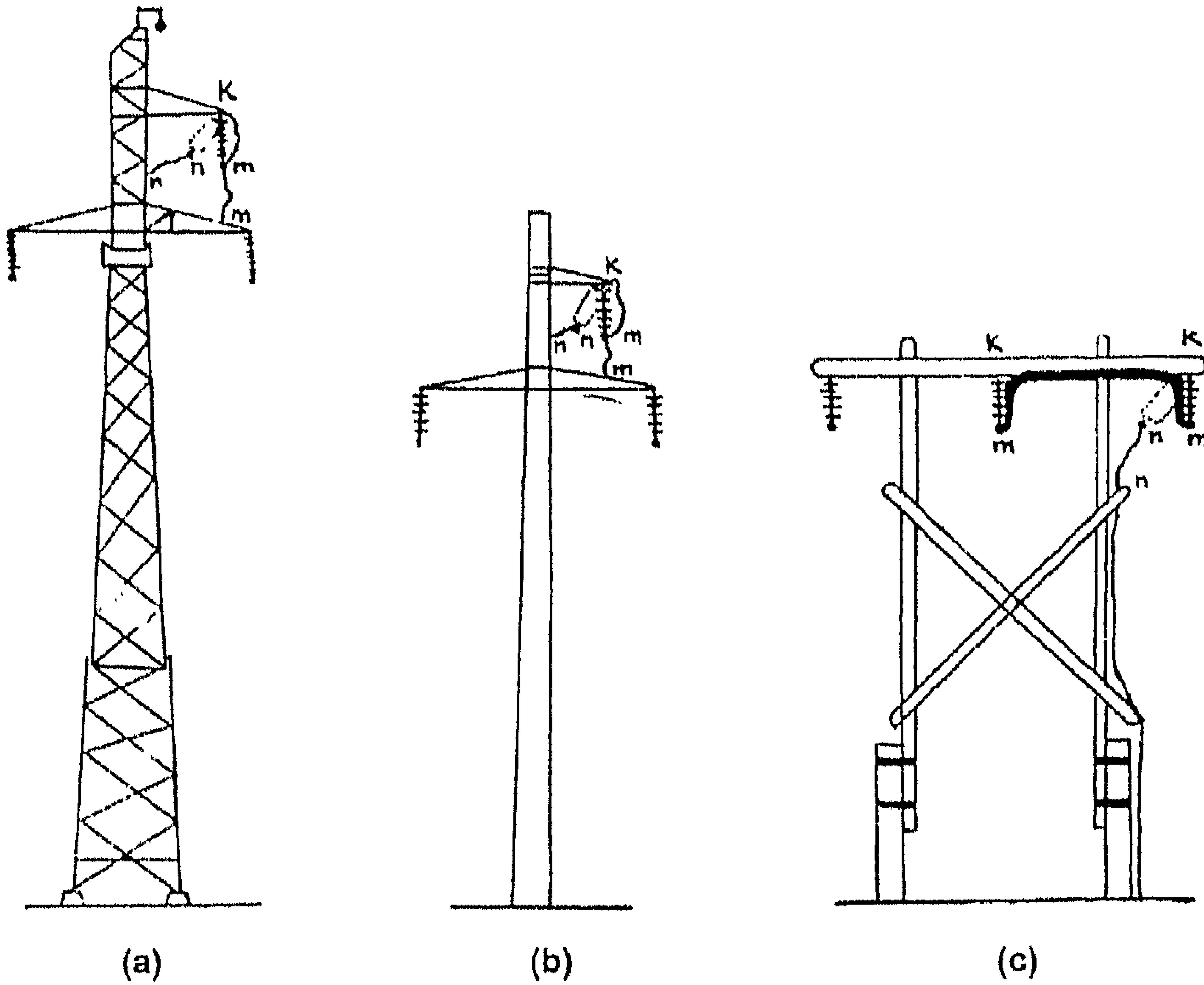
عزل خطوط النقل العلوية

Insulation of Overhead Transmission Lines

٦-١ معلومات عامة General Information

موصلات خطوط النقل العلوية [الهوائية] تكون معزولة عن بعضها وعن الأرض بواسطة ثغرات هوائية، ولهذا الغرض فإنها تُعلق على الدعائم بمساعدة عوازل بحيث يكون بينهم، وبالمثل بينهم والأرض، تُحفظ مسافة محددة عبر الهواء.

الجهود الزائدة الجوية والداخلية المؤثرة على عزل خطوط النقل العلوية هي سبب الأخطار على المتانة الكهربية في أحد الباعات spans أو على الدعائم –وهكذا– لتقطع الخطوط. ويمكن حدوث خرق العزل في الباع نتيجة لانهيار الثغرة الهوائية بين الموصلات ذات الأطوار المختلفة أو بين أي موصل وسلك الأرضي. بالقرب من الدعائم تكون الموصلات أقرب ما يمكن من المنشآت المعدنية المؤرضة أو من العناصر الخشبية والتي عبر سطحها يتولد تفريغ أسهل مما هو في الهواء. في الشكل 6.1 –كمثال– موضح الإنشاءات الأكثر انتشاراً للدعائم المتوسطة لخط 110 kV والمسارات التي يسير خلالها التفريغ الذي يمكن حدوثه موضحة أيضاً [التفريغ يُزعج العزل]. في الدعائم المعدنية والخرسانية [الشكل 6.1(a)، 6.1(b)] يمكن حدوث انهيار العزل بالنسبة للأرض فقط كالآتي: إما أثناء شرر سلسلة من العوازل عبر المسار *m-k*، أو بسبب انهيار ثغرة الهواء بين موصل والمنشأ المؤرض عبر المسار *n-n*. أما في الدعائم الخشبية [الشكل 6.1(c)] التي بدون سلك وقاية أرضي فإن انهيار العزل يمكن أن يحدث بين موصلات الأطوار المختلفة وأيضاً بالنسبة للأرض. والحالة الأولى يمكن أن ت حدث أثناء شرر سلسلتين من العوازل والقطاع *k-k* من الذراع المستعرض، الحالة الثانية تحدث أثناء انهيار الثغرة الهوائية *n-n* وشرر القطاع *n-s* لقطب الدعامة.



الشكل 6.1: المسارات الممكنة لشرر العزل على منشآت متوسطة لخط 110 kV .
(a) برج معدني؛ (b) قطب خرساني؛ (c) منشأ خشبي بدون سلك أرضي

لكي لا تزعج الجهود الجوية والداخلية عمل أي خط نقل، فيجب أن يكون له عزل، تتعدى المتانة الكهربية له سعة amplitude معظم الجهود الزائدة. ومع ذلك، فإن تخفيض الانقطاعات الناشئة عن الأعطال [الأخطاء] حتى مدى مقبول –بالتزود بمتانة عزل عالية فقط– تبدو غير مرغوبة اقتصادياً حيث إنها مرتبطة بضرورة الزيادة غير العادية في الثغرات الهوائية وفي عدد العوازل في السلسلة. وبالتالي فإن ذلك يتطلب زيادة في أبعاد الدعائم وبالتالي زيادة تكاليف إنشاء الخطوط أيضاً. ولهذا السبب، فإن إجراءات خاصة تضمن العمل المعول إليه عند تكلفة منخفضة نسبياً، وليكون أكثر ضبطاً، عند مستوى عزل مرغوب اقتصادياً تُشترط لخطوط النقل. أجهزة الوقاية من الصواعق التي تُحد من عدد ومقدار الجهود–الزائدة –وبالمثل– المعدات القادرة على تصفية أنواع التدمير التي تظهر على الخطوط بدون تقطع الإمداد للمستهلكين [أجهزة إطفاء القوس، أجهزة إعادة الغلق الآلية، ...إلخ] تنتمي لهذه الإجراءات. وبهذا الخصوص توضع المطالب التالية على عزل خطوط النقل العلوية:

١. يجب أن يقاوم العزل الغالبية العظمي من الجهود الزائدة الداخلية التي تنشأ في خط النقل. الاستثناءات هي أنواع قليلة من الجهود الزائدة ذات السعة الأعلى، إمكانيات حدوثها تكون صغيرة. واعتبارهم سيسبب زيادة في تكلفة الخط. وبسبب ذلك، فأثناء اختيار العزل، يمني الناس أنفسهم بما يسمى المستوى النظري للجهود الزائدة الداخلية والتي تكون أقل من الحد الأقصى الممكن.

٢. يجب أن تكون المتانة النبضية [الدفعية] للعزل كافية لخلق حماية ضد الصواعق اقتصادية ومؤثرة.

أهمية هذه المطالب للخطوط ذات الجهود الاسمية المختلفة ليست واحدة –مع ذلك– فحالياً يتم اختيار العزل في كل الحالات على أساس الجهود الزائدة الداخلية. فعندما يتم ذلك للخطوط 110 kV وما فوقها، فإن المتانة النبضية للعزل تصبح كافية تماماً لضمان جودة مقاومة صواعق عالية للخط بمساعدة وسيلة بسيطة نسبياً للحماية من الصواعق.

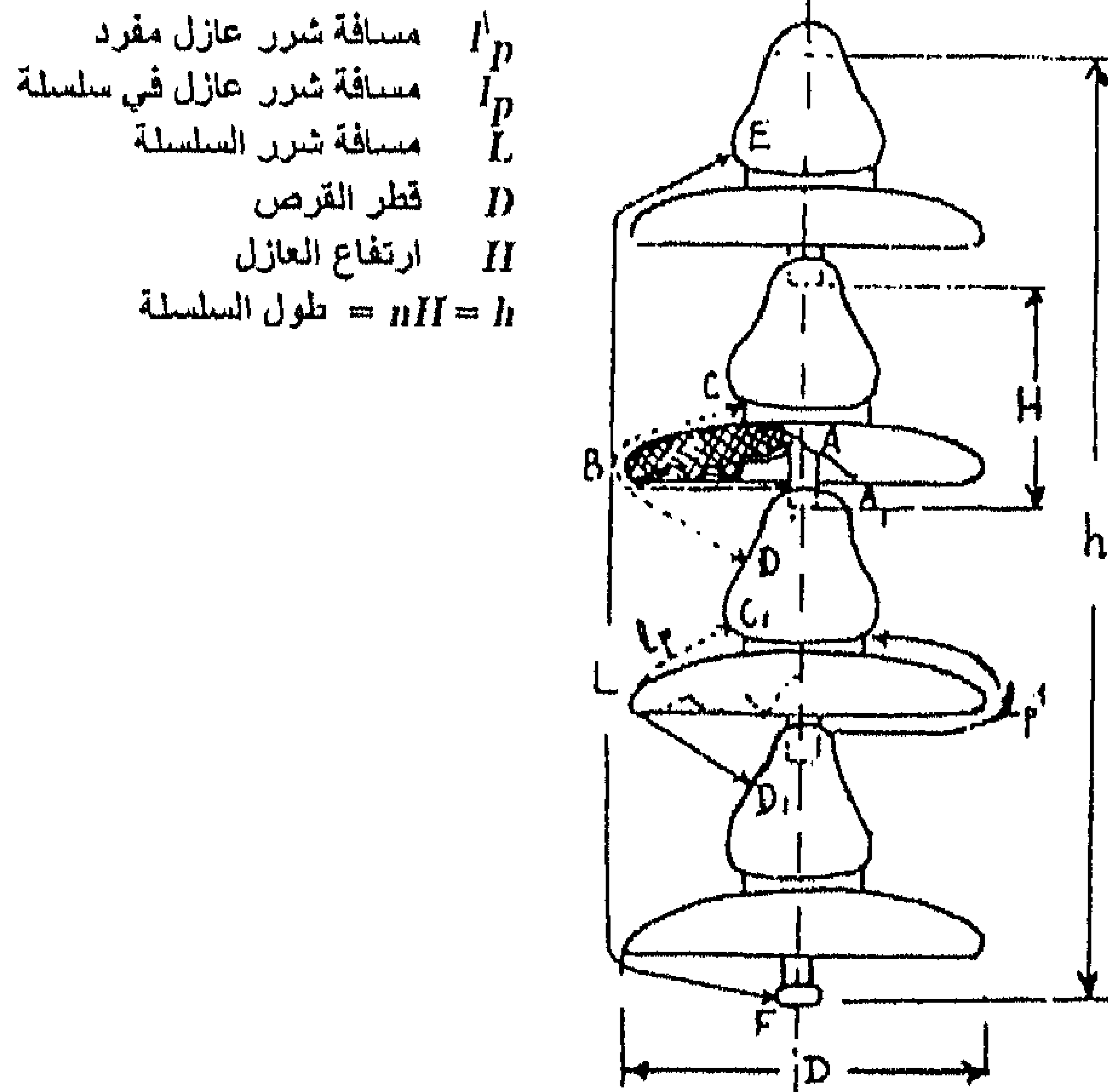
عند جهد 35 kV تكون المتانة النبضية للعزل المختار على أساس الجهود–الزائدة الداخلية غير كافي لضمان عدد صغير من التقطعات الناشئة من الصواعق. وللتغلب على هذا العيب، يفضل استخدام أجهزة إطفاء القوس التي تصفي شرر العزل بدون تقطع ولكن لن يزداد العزل.

٦-٢ سلاسل عوازل التعليق Strings from Suspension Insulators

كما أشرنا في الفصل ٥، فإن تثبيت الموصلات بالدعامات لكل الجهود 110 kV وما فوقها، وبالمثل لمعظم خطوط 35 kV تنفذ بمساعدة عوازل تعليق موصلة في سلاسل. في الدعامات المتوسطة، تعلق السلاسل المسماة سلاسل داعمة رأسياً. في دعامات التثبيت، توضع السلاسل أفقية غالباً وتأخذ شد الموصل، وتسمى "عوازل انفعالية" [عوازل شد] strain insulator. المتانة الميكانيكية للسلسلة تحدد بواسطة متانة العوازل المكونة للسلسلة. لذلك، تصنع من العوازل من ذلك الطراز القادر على مقاومة الحمل الأعلى. مع أحمال كبيرة خاصة، عندما تبدو المتانة الميكانيكية للعوازل أنها غير كافية [الباعات الطويلة التي تعبر فوق نهر واسع، مناطق سقوط الثلوج الثقيلة، ...إلخ] تستخدم سلاسل مكونة سلسلتين أو أكثر متماثلة وموصلة على التوازي.

المتانة الكهربية لأي سلسلة لا يمكن الحكم عليها بدقة كافية من جهد شرر العوازل المنفصلة وعدد هذه العوازل في السلسلة. وقد شُرح ذلك بحقيقة أن مسافة الشرر أي الحد الأدنى من المسار الممكن l'_p عبر الهواء بين الإلكترودات لعازل مفرد [الشكل 6.2] يختلف عن مسافة

الشرر l_p لعازل موجود في سلسلة. وبعبارة أخرى، فإن مسارات التفريغ لعازل مفرد وعازل في سلسلة تكون مختلفة.



الشكل 6.2: الأبعاد الرئيسية لسلسلة من عوازل التعليق

التفريغ بطول سلسلة من العوازل يمكن أن يتولد عبر مسار من ثلاث مسارات:

١. كله عبر سطح العازل بطول المسار CBA أو CBA_1 أي بنفس الطريقة مثل العازل المفرد.

٢. عبر المسار CBD، وطوله يساوي $n\,l_p$ حيث n هي عدد العوازل في السلسلة.

٣. عبر المسار الأقصر والأدنى المكن EF، طوله مع عدد كبير من العوازل في السلسلة يساوي تقريباً طول السلسلة $L = nH$.

ويعتمد جهد الشرر للسلسلة على المسار الذي يتخذه التفريغ.

المتانة الكهربية عبر المسار EF يكون عملياً مساوياً لمتانة ثغرة هوائية بين إلكترودات عمود–عمود طولها L، حيث إن التفريغ يتولد غالباً بالكامل عبر الهواء.

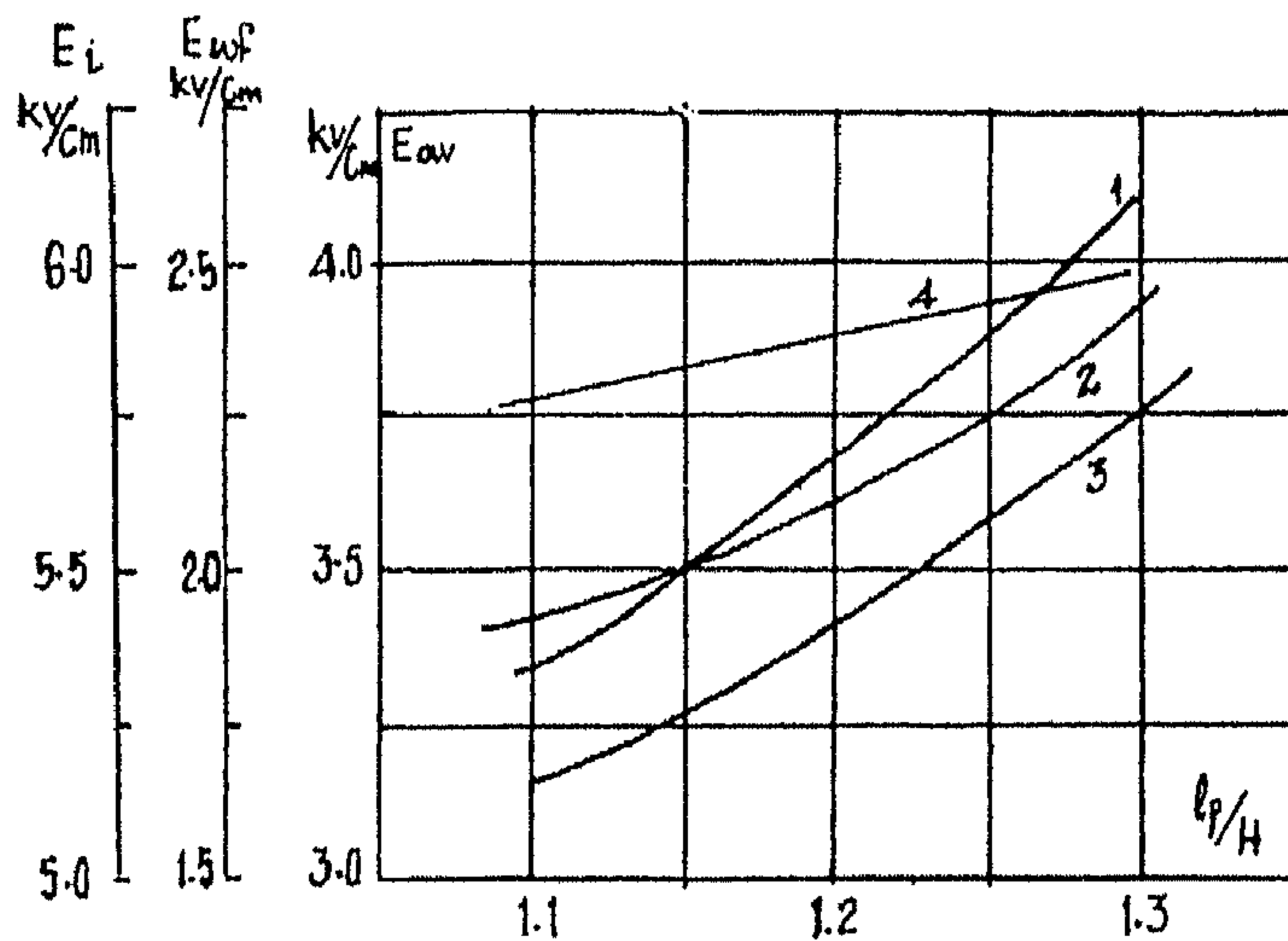
تدرجات الشرر أثناء نمو التفريغ جزئياً أو كلياً عبر أسطح العوازل يكون أقل منه أثناء التفريغ في الهواء، لذلك بالنسبة للأبعاد العادية للعوازل يكون جهد الشرر عبر المسار CBD أقل منه عبر المسار EF بالرغم من حقيقة أن $L < n\,l_p$. لذلك، لزيادة جهد شرر سلسلة

أجريت محاولة لزيادة النسبة l_p/H لكي نحضر المتانة الكهربية عبر المسار CBD قريبة من المتانة عبر المسار EF. وأوضحت التجارب أنه عند قيمة النسبة l_p/H تساوي 1.3، يتولد التفريغ عبر المسار EF وتصل تدريجات الشرر الجاف إلى أقصى قيم ممكنة مساوية لتدرجات الانهيار المتوسطة لثغرة عمود–عمود. وزيادة النسبة l_p/H إلى أكبر من 1.3 تبدو غير مرغوبة.

ولزيادة النسبة l_p/H إما أن نزيد قطر القرص D أو يُقصر ارتفاع العازل H بتخفيض أبعاد غطاءه وطول عموده. الطريقة الأولى أقل رغبة حيث تسبب زيادة للأبعاد ووزن العازل أيضاً.

زيادة المتانة الميكانيكية للعوازل تسبب بدون تغير زيادة في أبعاد رؤوسهم. لذلك، يصبح من الضروري أن نزيد آنياً قطر الأقراص أيضاً لكي نحفظ النسبة المثلى l_p/H.

أثناء الأمطار يكون الجهد مؤثراً بالكامل غالباً على السطح السفلي المبلل إلى درجة صغيرة، لذلك فإن أي زيادة في l_p/H تسبب زيادة في جهد الشرر المبلل للسلسلة.

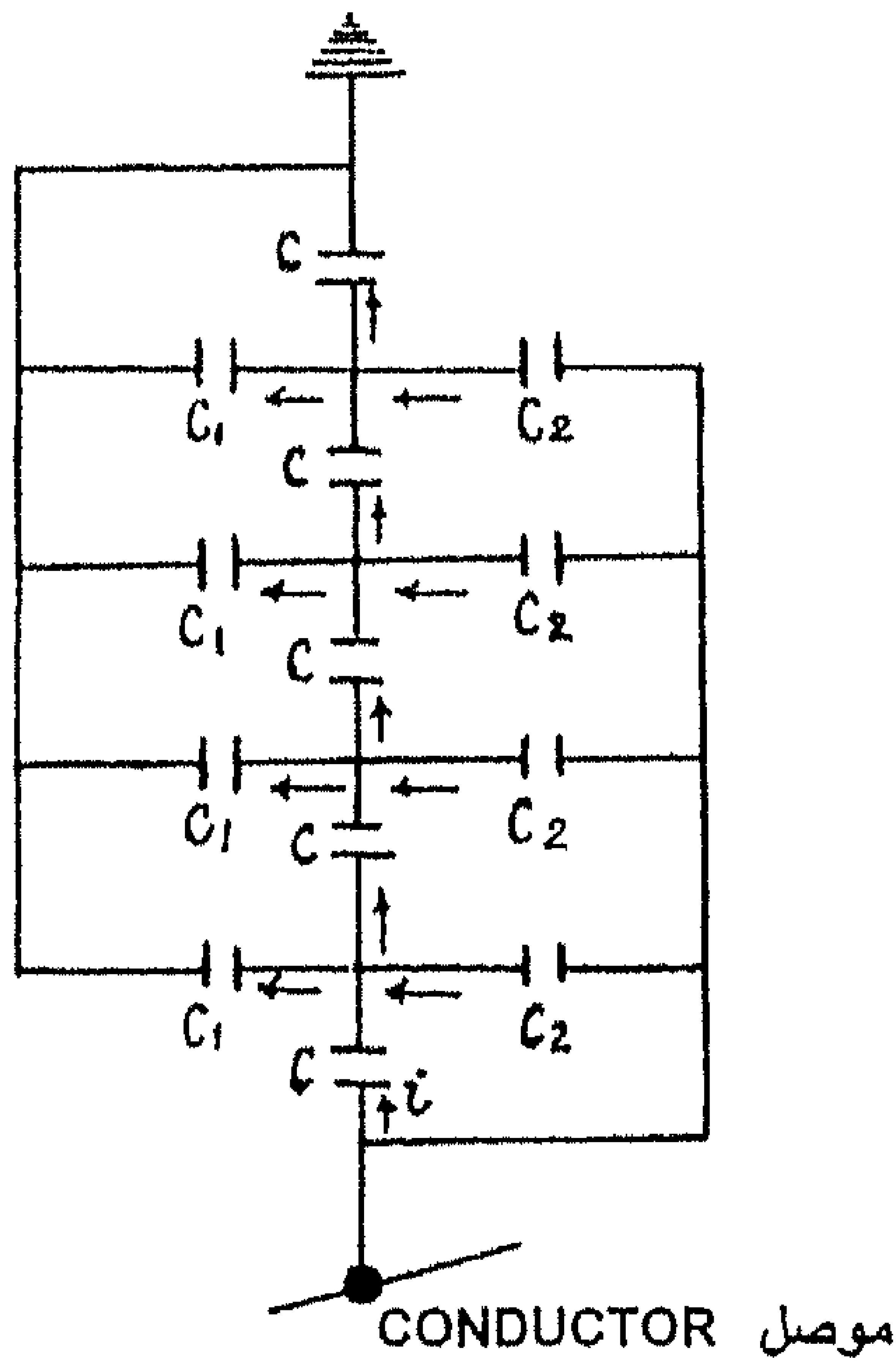


الشكل 6.3: تأثير l_p/H على ميول الشرر المتوسطة لسلاسل من 14-6 قرص عازل. (1) E_{av} تدريجات الشرر الجاف المتوسطة؛ (2) E'_{wf} تدريجات الشرر المبلل؛ (3) E''_{wf} تدريجات الشرر المتوسطة لموجة كاملة ذات قطبية موجبة؛ (4) E_{imp} تدريجات الشرر المتوسطة لموجة كاملة ذات قطبية سالبة

في الشكل 6.3 تدريجات الشرر المتوسطة للسلاسل من (14–6) عازل عند .a.c والجهود النبضية معطاة كدالة في l_p/H. ويستخدم ما يسمى بـ"التركيبات الوقائية" أو "الحلقات الواقية" لجعل توزيع الجهد عبر العوازل أكثر انتظاماً وأيضاً بالمثل تؤثر على قيمة جهد الشرر

للسلسلة ومسار التفريغ. والحقيقة هي أن العوازل في السلسلة تكون تحت شروط مختلفة حيث إن الجهد بينهم يكون موزعاً بغير انتظام. ولشرح عدم الانتظام هذا سنرجع للدائرة المكافئة للسلسلة الموضحة في الشكل 6.4. في الشكل 6.4 تكون C هي السعة الذاتية للعازل والتي قيمتها $(50–70)\ \mu F$ للعازل القرص، C_1 هي سعة العازل مع الأرض، C_2 هي سعة العازل بالنسبة لموصل الخط. قيمة السعات C_1، C_2 تعتمد على موقع العازل في السلسلة، وفي المتوسط $C_1 = 4.5\ \mu F$، $C_2 = (0.5–1)\ \mu F$.

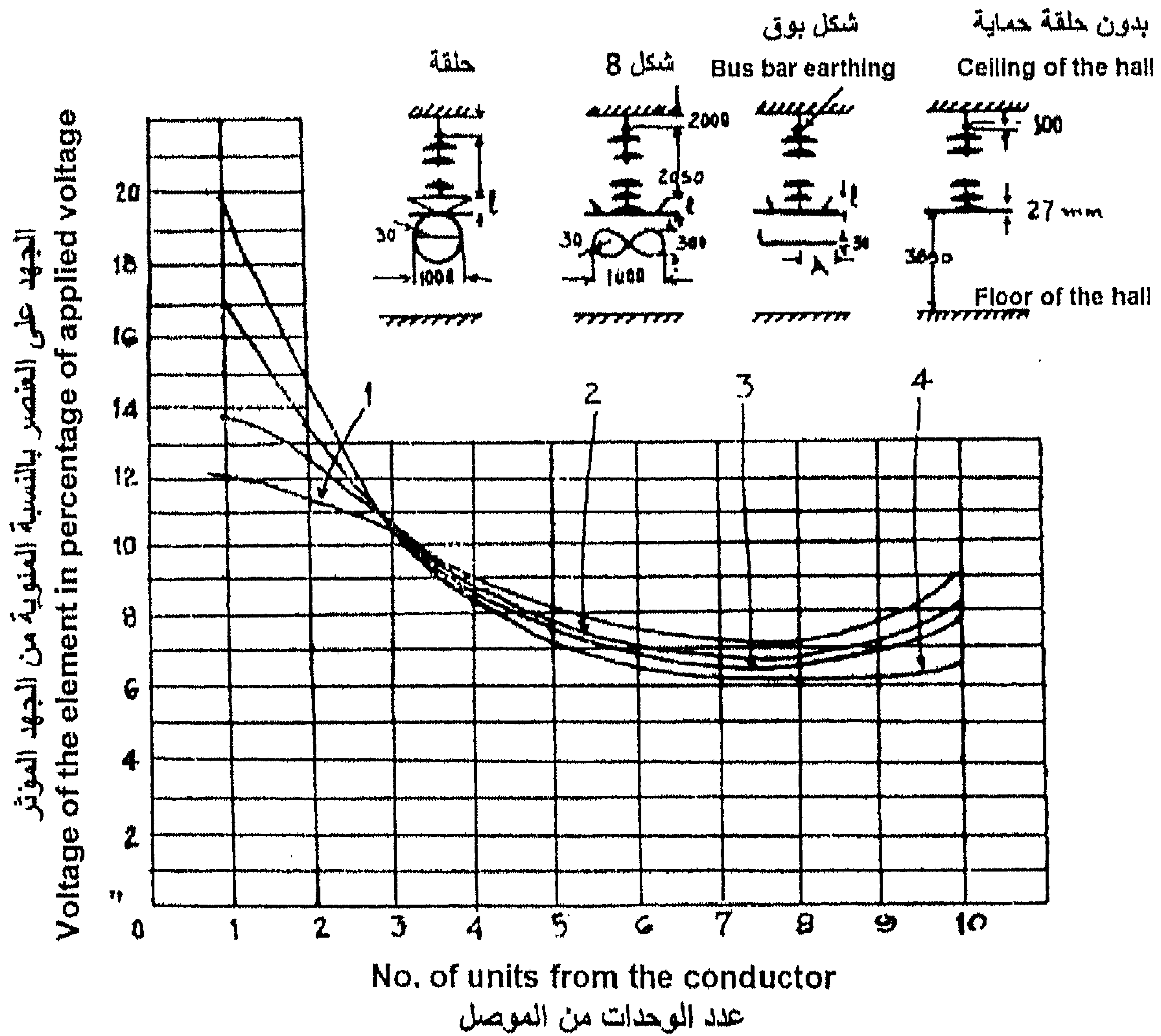
وجود السعات C_1، C_2 بمفردها يسبب توزيع غير منتظم للجهد عبر عناصر السلسلة. وسنبدأ بدراسة تأثير السعة مع الأرض C_1 فقط. من الواضح، وبسبب تفرع التيار في هذه السعات، فإن التيارات المارة خلال السعات الذاتية للعوازل –وبالتالي– هبوط الجهد عبر العوازل سيكون صغيراً كلما بَعُد العازل عن الموصل. والآن إذا فحصنا تأثير السعات بالنسبة للموصل فقط ستكون الصورة مختلفة، فالتيارات عبر السعات C وهبوطات الجهد المقابلة الآن ستكون أصغر عبر تلك العوازل الموجودة بعيداً عن الطرف المؤرض من السلسلة. السعات مع الأرض C_1 لها قيمة أكبر من السعات بالنسبة للموصل C_2، لذلك فإنها تبذل تأثيراً سائداً على صفة توزيعات الجهد بطول عوازل السلسلة. ويقع الجهد الأكبر على العوازل الموضوعة قريباً من الموصل والأصغر على الموصلات الموضوعة عند منتصف السلسلة وجهد كثير يأتي على العوازل الموضوعة قريباً من الطرف المؤرض للسلسلة. درجة عدم الانتظام في توزيع الجهد تزداد مع زيادة طول السلسلة حيث تزداد الآن السعة الكاملة للسلسلة بالنسبة للأرض.



الشكل 6.4: الدائرة المكافئة لسلسلة من العوازل

تنطبق هذه المناقشات جيداً على تلك السلاسل من العوازل التي لها أسطح جافة ونظيفة. ومع ترطيب العوازل أثناء الأمطار وبالمثل مع توسّخ أسطحها فإن توزيع الجهد يحدد أساساً بواسطة التوصيلية conductivity، غالباً ما يكون أكثر انتظاماً.

بسبب التوزيع غير المنتظم للجهد عبر عوازل السلسلة، ففي العوازل الأقرب للموصل حتى عند جهد التشغيل تنشأ الكورونا والتي ترفع من الضوضاء اللاسلكية وتسبب صدأ الأجزاء المعدنية للعازلات. وتظهر الكورونا على العازل الذي عليه جهد في حدود kV (25–20). وبسبب التوزيع غير المنتظم –بغض النظر عن عدد العوازل في السلسلة– فإن حوالي 20% من الجهد الكامل يأتي دائماً على العازل من الموصل أولاً. وهذا يعني أنه عند الجهود الاسمية 150 kV وما فوقها ستكون هناك جهود كافية لحدوث الكورونا على العوازل الأقرب للموصل. في هذه الحالات فمن الضروري اتخاذ إجراءات لتسوية توزيع الجهد عبر السلسلة. وهذه الإجراءات هي استخدام تركيبات حماية [حلقات حماية، حلقات معدنية على شكل 8، أو بيضاوية] تثبت عند طرف السلسلة من جهة الموصل.

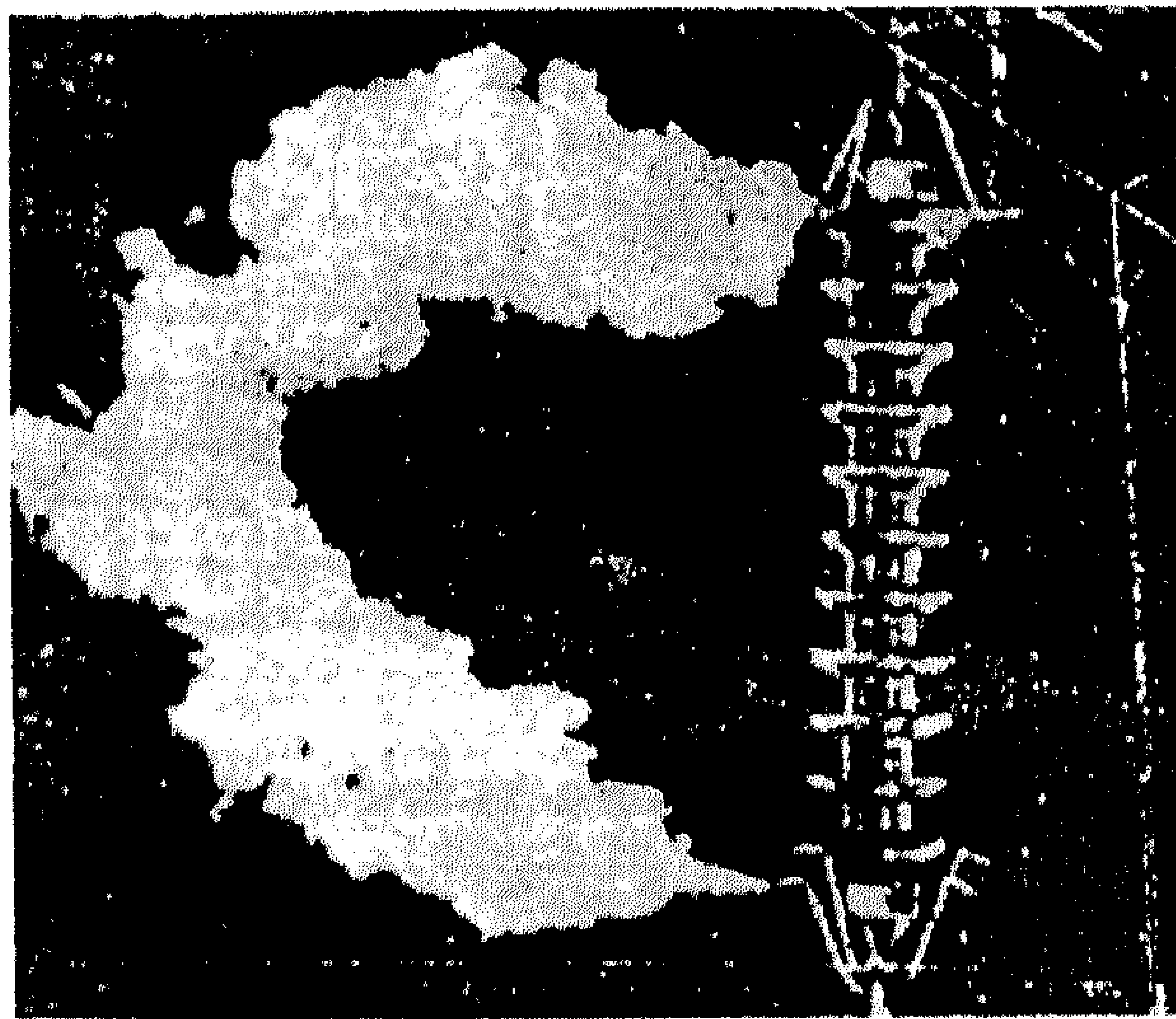


الشكل 6.5: توزيع الجهد عبر سلسلة من العوازل طراز 10، π-4, 5 مع أنواع مختلفة من حلقات الحماية المركبة على الموصل. (1) حلقة؛ (2) شكل 8؛ (3) شكل بوق؛ (4) بدون حلقة حماية

هذه التركيبات تزيد من سعات العوازل بالنسبة للموصل وبسببها فإن هبوط الجهد على العوازل الأقرب للموصل ينخفض. في الشكل 6.5 موضح منحنيات توزيع الجهد عبر السلسلة مع وبدون التركيبات التي على هيئة حلقة وشكل 8. فعل التساوي للتركيبات التي على شكل 8 ذات الأبعاد الأقل مرتين في الاتجاه العمودي على الموصل تكون أقل قليلاً من ذلك الخاص بتركيبات الحلقة. وعلاوة على ذلك، فإن استخدام تركيبات شكل 8 تسمح بتقصير المسافات بين الأطوار وأبعاد الدعائم.

تجزئ الطور إلى عدد من الموصلات [موصلات حزمة] يؤدي إلى شروط أكثر تفضيلاً لأنه في هذه الحالة تكون سعة العوازل بالنسبة للموصلات أكبر. وتعمل الموصلات مجزأة الطور كتركيبات حماية، لذلك فإن تركيب الأخيرة يمكن أن يُبسط.

حتى حديثاً كان دور حماية العوازل من التدمير أثناء شرر السلسلة -بعيداً عن تساوي الجهد- مخصصاً للتركيبات الواقية. وإذا لم تزود سلسلة بالتركيبات، فإن قنوات التفريغ تكون أقرب لأسطح العوازل وقوس الجهد الشغال ينتج في الحال بعد أن يُسخن التفريغ العازل عند مكان التلامس أثناء امتداد الحرق. التسخين غير المنتظم لعازل يؤدي إلى تدميره. تركيب أبواق معدنية في هذه الحالة من جانب الطرف المؤرض للسلسلة مع تركيبات الحماية المثبتة من جانب الموصل سيؤدي إلى نجاح حرق قوس الجهد الشغال عند مسافة عديمة الضرر من السلسلة [الشكل 6.6].

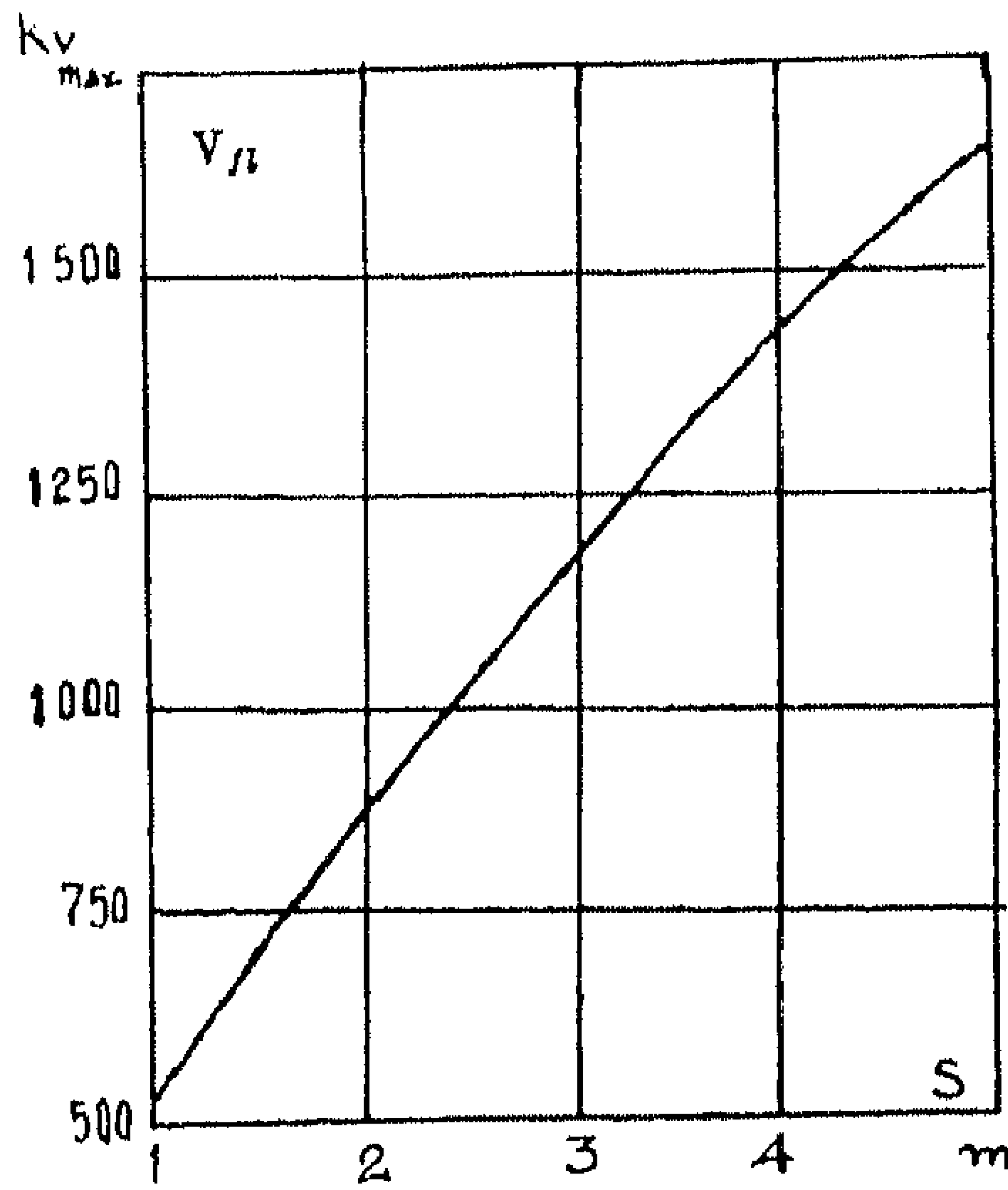


الشكل 6.6: صورة قوس عبر سلسلة في وجود أبواق حماية

ومع ذلك، فالتقطع السريع جداً للخطوط قصر من زمن حرق الأقواس قليل من أعشار الثانية، وقلل بشكل هائل من إمكانية تدمير العوازل بواسطة الأقواس. وسمح ذلك بنبذ استخدام التركيبات في خطوط 110 kV وأقل حيث لا تحتاج لتساوي توزيع الجهد عبر السلسلة.

توزيع الجهد عبر عوازل اسطوانية له نفس الطبيعة مثل عبر السلاسل المصنوعة عوازل قرصية الطراز. هنا أيضاً أي زيادة في التدرجات على عناصر العوازل المجاورة للموصل تُلاحظ. وينفذ تساوي توزيع الجهد عبر عوازل اسطوانية أيضاً بمساعدة تركيبات متماثلة.

مبكراً، كان قد افترض أن التوزيع غير المنتظم للجهد عبر سلسلة يجعل شرر العوازل الأكثر تحميلاً الأقرب للموصلات أسهل -وهكذا- ينخفض جهد الشرر الجاف. ومع ذلك -أخيراً- تأكد أن تأين الهواء قريباً من سطح العوازل الذي يسبق التفريغ يسبب تغير حاد في توزيع الجهد ويجعله أكثر انتظاماً. لذلك، فإن تركيبات الحماية تخفض جهد الشرر الجاف قليلاً جداً.



الشكل 6.7: جهود الشرر الجاف لسلسلة من العوازل مزودة بحلقات واقية. S أدنى مسافة في الهواء بين حلقة الوقاية والذراع المستعرض لمنشأ الدعامة. وبالنسبة للسلاسل بدون حلقات وقاية، فإن جهود الشرر الجاف V_{fl} تكون أقل من 100%

قيمة جهد الشرر الجاف لسلسلة لا يعتمد على طراز العوازل ويحدد لسلاسل مع تركيبات بالمسافة الأدنى في الهواء بين التركيبة وغطاء العازل الأعلى. ويوضح الشكل 6.7 جهود الشرر الجاف لسلاسل مع تركيبات. بالنسبة للسلاسل مع التركيبات تكون جهود الشرر الجافة 10% أقل.

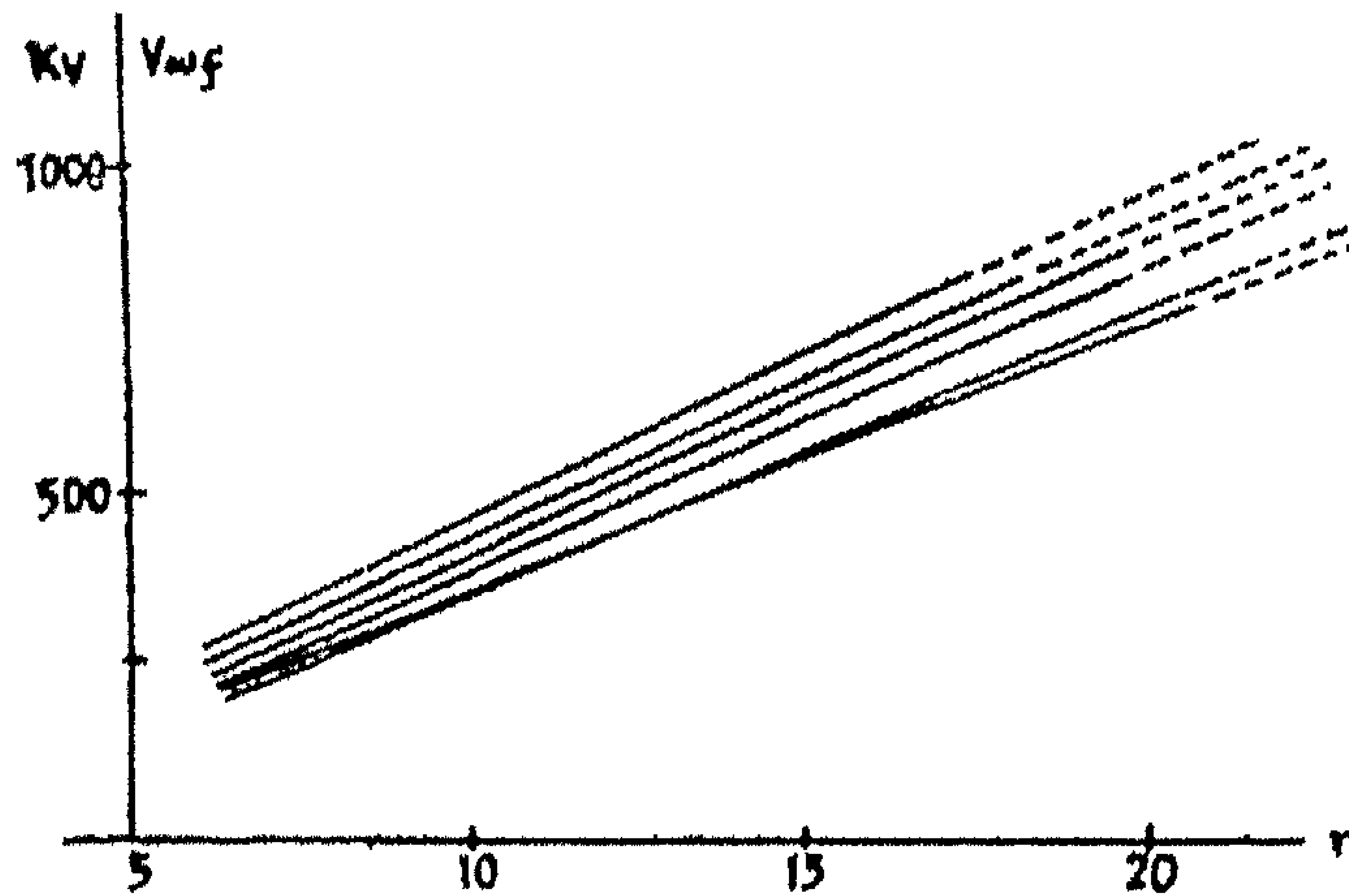
في الشكل 6.8 معطى جهود الشرر المبلل لسلاسل من أنواع مختلفة. وكما نرى فإن جهد الشرر المبلل لسلسلة V_{wfl} يتغير عملياً خطياً مع عدد العوازل n ويمكن التعبير عنه بالعلاقة الآتية:

$$V_{wfl} = n\,E_{wfl} \cdot H \qquad (1.6)$$

حيث E_{wfl} = متوسط شدة الشرر المبلل للعوازل طراز π-4, 5 ، π-7 ، π-8, 5 ، وهي تساوي 2.15 kV/cm وبالنسبة لطراز πM -4, 5 تساوي 2.70 kV/cm .

H = ارتفاع عازل واحد [انظر الجدول 5.2].

جهود الشرر النبضية للسلسلة معطاة في الجدول 6.1.



الشكل 6.8: جهود الشرر المبلل لسلسلة من العوازل

٦-٣ اختيار عدد العوازل في سلسلة وأدنى مسافات عازلة

Choice of Number of Insulators in a String & of Minimum Insulating Distances

عدد العوازل في أي سلسلة يجب أن يكون بحيث يتعدى جهد الشرر المبلل للسلسلة V_{wfl} المستوى النظري للجهود الزائدة الداخلية internal over voltages (i.o.v) أي أن:

$$V_{wfl} \geq k\,V_{i.o.v}$$

وباستخدام المعادلة (6.1) والتعبير عن العلاقة بين جهد الشرر المبلل للعازل بدلالة عدد العوازل نحصل على:

$$n \geq k\,\frac{V_{i.o.v}}{E_{wfl} \cdot H} \qquad (2.6)$$

المعامل k يأخذ في الاعتبار حقيقة أنه عند لحظة حدوث الجهد الزائد الداخلي فإن e.m.f. لمصدر النظام يمكن أن يكون لها مقادير متزايدة.

الجدول 6.1 : جهود الشرر النبضية لسلسلة من العوازل

نوع العازل	عدد العوازل في السلسلة	جهد الشرر النبضي (kV_{max})			
		قطبية موجبة ← 50%	قطبية سالبة القيمة →	قطبية موجبة عند ←	قطبية سالبة 3 µ sec. →
1	2	3	4	5	6
π-4, 5	6	570	570	790	780
	7	665	645	905	880
	10	930	860	1260	1160
	12	1000	1000	1450	1340
	14	1270	1140	1630	1490
	18	1600	1400	1940	1750
π-7	6	510	560	660	630
	7	595	645	770	735
	10	850	870	1100	1040
	12	1020	1000	1320	1235
	14	1190	1130	1540	1425
	18	1500	1370	1980	1795
	20	1640	1485	2200	1980
π-8, 5	6	610	660	800	780
	7	710	745	930	885
	10	1000	1000	1300	1170
	12	1200	1130	1540	1320
	14	1400	1230	1770	1460
	18	1750	1400	2230	1720
πM-4, 5	6	510	525	690	690
	7	600	600	800	785
	10	870	830	1130	1050
	12	1040	980	1340	1200
	14	1210	1120	1550	1350
	18	1530	1390	1970	1670
	20	1690	1520	2170	1820
	22	1850	1650	2370	1960

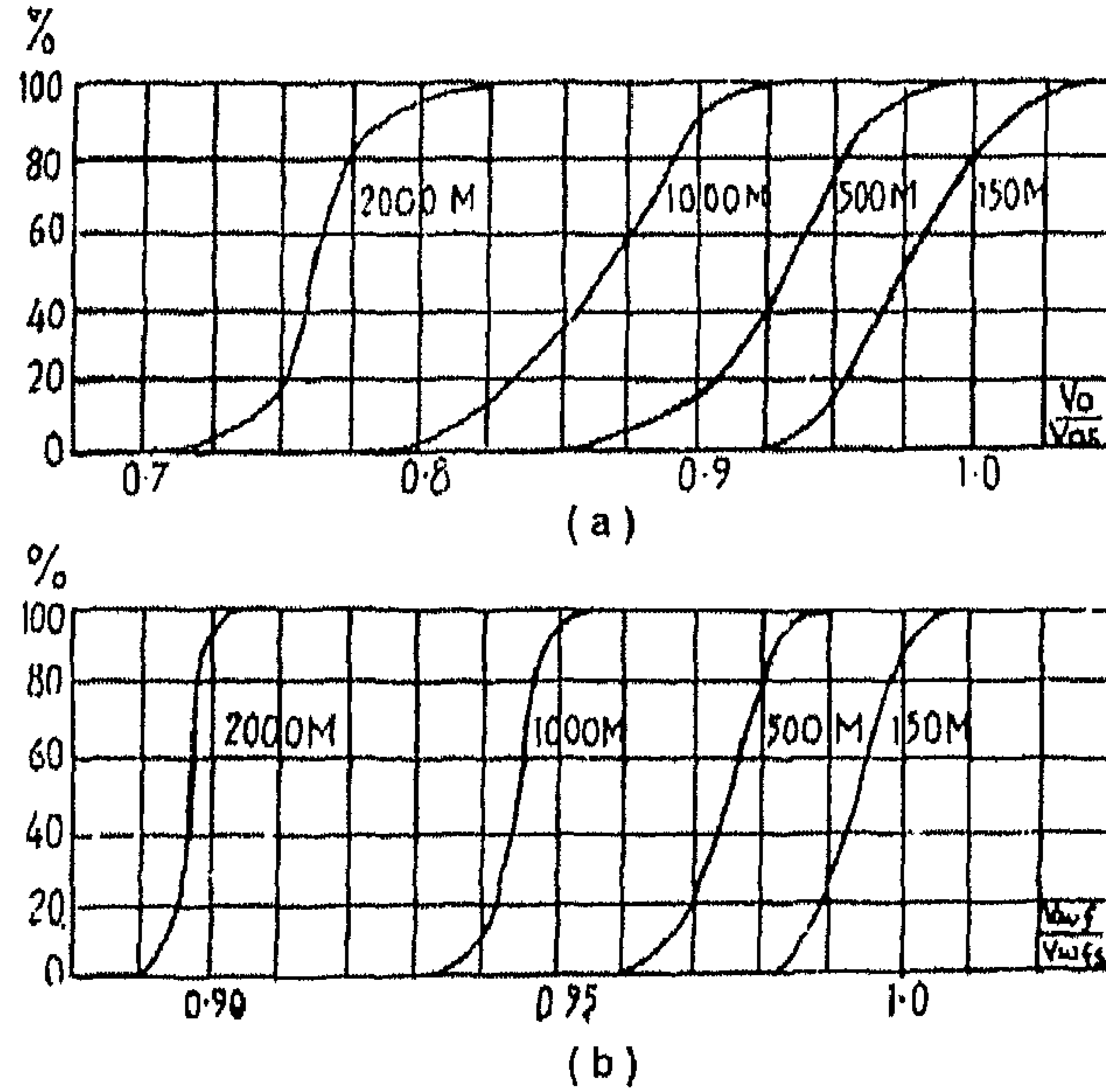
نوع العازل	عدد العوازل في السلسلة	جهد الشرر النبضي (kV_{max})			
		قطبية موجبة 50% ←	قطبية سالبة القيمة →	قطبية موجبة عند ←	قطبية سالبة 3 µ sec. →
1	2	3	4	5	6
πC-4, 5	6	480	490	510	580
	7	555	560	635	665
	10	770	750	940	900
	12	900	865	1110	1040
	14	1030	980	1260	1170
	18	1290	1200	1550	1420
	20	1420	1310	1680	1540
	22	1550	1410	1810	1660
πC-8, 5*	6	480	500	650	640
	7	565	570	760	730
	10	820	780	1060	990
	12	990	920	1260	1140
	14	1150	1050	1430	1289
	18	1470	1300	1740	1530

* من زجاج قلوي مصلد.

لتنظيم الجهد عند الموصلات العمومية bus bars للمستهلكين الأبعد، يُسمح بزيادة الجهد بـ 15% فوق القيمة الاسمية في الخطوط التي لها جهد اسمي 330 kV فأقل. وعلى ذلك فإن قيمة الذروة amplitude للجهود الزائدة الداخلية يمكن أن تكون أكبر بـ 15% من تلك المحسوبة حسب جهد الطور الاسمي. وعلاوة على ذلك، بمساعدة المعامل k يؤخذ في الاعتبار الانخفاض الممكن في جهد الشرر أثناء التوليفة غير المفضلة لدرجة الحرارة، الضغط ورطوبة الهواء.

في الشكل 6.9 موضح المنحنيات المتوسطة لاحتمالات تخفيض المتانة الكهربية لثغرات الهواء وجهود الشرر المبلل للعوازل. وقد أنشأت طبقاً لنتائج عدد كبير من التسجيلات الآنية لدرجة الحرارة، الضغط والرطوبة عبر عدد من السنين عند أماكن قليلة من أراضي الاتحاد السوفيتي السابق. وأثناء إنشاء هذه المنحنيات كان قد تحدد تأثير الظروف الميترولوجية على الجهود الزائدة حسب العلاقة (6.1) لثغرات الهواء وحسب العلاقة (6.2) لسلاسل من العوازل [جهود شرر مبللة]. من منحنيات الشكل 6.9 نرى أنه في المواقع الموجودة عند ارتفاع حتى

100 m فوق مستوى البحر، من الضروري أن نعتبر إمكانية تخفيض المتانة الكهربية لثغرات الهواء بحوالي 20% وجهود الشرر المبلل لسلاسل العوازل بـ 7% .



الشكل 6.9: المنحنيات المتوسطة لتوزيع احتمالات تخفيض جهد الشرر في الهواء V_d (a) وجهد الشرر المبلل V_{wfl} (b) لعوازل عند ارتفاعات مختلفة فوق مستوى البحر

بعيداً عن ذلك، أثناء اختيار عدد العوازل، فإن الانحراف عن الشروط الحقيقية للتشغيل عن تلك التي تمت تحتها قياسات جهد الشرر المبلل V_{wfl} تعتبر أيضاً.

لقياس V_{wfl} تم التوحيد القياسي [تقنين] لشروط أكثر شدة [شدة المطر 3 mm/min ، مقاومة مياه الأمطار 10,000 ohm·cm ، ارتفاع ناعم للجهد] من تلك التي يمكن أن تحدث حقيقة أثناء تشغيل الخط [شدة المطر عادة لا تكون أكبر من 2 mm/min ، مقاومة مياه الأمطار 20,000 ohm·cm ، زمن فعل الجهد في حدود 0.05 sec.]. وحسب ذلك في شروط التشغيل V_{wfl} ستكون أكبر بـ 20% من تلك المقاسة في المعمل. المعامل k بالمثل يشمل هامش أمان في حدود 10% .

وللتوضيح، فكل ما سبق قوله عن المعامل k معطى على هيئة ملخص في الجدول 6.2 قيمة k نحصل عليها هنا بضرب كل معاملات التصحيح التي تأخذ في الاعتبار تأثير العوامل المنفصلة.

الجدول 6.2: العوامل المأخوذة في الاعتبار أثناء اختيار عدد العوازل في سلسلة حسب المعادلة (6.2) بمساعدة المعامل k

المعامل	معامل التصحيح
زيادة جهد الطور فوق القيمة الاسمية.	1.15
تغير غير مفضل للظروف الجوية.	1.07
فرق شروط التشغيل عن شروط القياس:	
(أ) شدة الأمطار.	0.95
(ب) مقاومة مياه الأمطار.	0.90
(ج) زمن فصل الجهد.	0.95
هامش التغير من جهد الشرر إلى قيمة المقاومة.	1.10
المعامل k في المعادلة (6.2).	1.10

وبهذه الطريقة، فإن شرط اختيار عدد العوازل في سلسلة يأخذ الشكل:

$$n \geq \frac{1.1 V_{i.o.v}}{E_{w/l} \cdot H} \qquad (3.6)$$

عادة ما يُفترض إضافة عازل واحد لأنه أثناء التشغيل يمكن أن يُدمر أحد العوازل. وهو يضاف إلى عدد العوازل المستخرج من المعادلة (6.2).

مثال حساب عدد العوازل في سلاسل خطوط النقل kV (330–35) معطاة في الجدول 6.3.

في عوازل الانفعال عند التثبيت والدعائم الزاوية، يزداد عدد العوازل عادة بواحد للخطوط kV (150–35) وباثنين للخطوط 220 kV وما فوقها. ويتم ذلك لزيادة هامش الأمان حيث عوازل سلاسل الانفعال تعمل تحت أحمال ميكانيكية أكبر.

تبين خبرة التشغيل أن السلاسل التي لها عدد من العوازل كما في الجدول 6.3 لها متانة كهربية كافية وتضمن أداء يعتمد عليه للخطوط العلوية. مع هذه السلاسل فإن الفعل الممتد للجهد العامل على العوازل لا يسبب أي ردائة ملحوظة في خصائص عزلها، لذلك فبعد عدة سنوات قليلة من التشغيل، تُلاحظ بعض علامات التقدم في العمر للعوازل [نمو $\tan\delta$]. مع عدد العوازل في السلسلة كما أسلفنا، فإن تيارات التسرب [في غياب ترسبات الملوثات شبه الموصلة على سطح العوازل] تكون صغيرة و–لذلك– ففي حالة الدعائم الخشبية لا ينشأ خطر احتراقهم.

الجدول 6.3: عدد العوازل في سلاسل الدعائم

		35	110	150	220	330
الجهد الاسمى (kV)		35	110	150	220	330
القيمة المحسوبة للجهود الزائدة الداخلية، kV، في جهد المصدر		77 3.8	204 3.2	260 3.0	381 3.0	510 2.7
عدد العوازل في السلسلة: حسب المعادلة (6.3)	π-4, 5	2.3	6.1	7.8	11.5	15.3
	π-7	–	5.6	7.2	10.6	14.1
القيمة الموصى بها	π-4, 5	3	7	9	13	16
	π-7	–	7	9	12	13

في طريقة اختيار عدد العوازل المفحوصة بواسطتنا، إمكانية تخفيض جهد الشرر أثناء اتساخ سطح العوازل لا يؤخذ في الاعتبار. اتساخ سطح العوازل بالأتربة العادية لا يسبب انخفاض ملحوظ في جهد الشرر الجاف. وفي كل الأحوال، يبقى أعلى من جهد الشرر المبلل، الذي طبقاً له يتم تحديد عدد العوازل في السلسلة. وبالتالي، فإن جهد الشرر المبلل لا يتغير أثناء الاتساخ، حيث عند بداية الأمطار، تغسل القذارة ويحدث التفريغ بعد ذلك عبر سطح نظيف. ويحدث الانخفاض الملحوظ في المتانة الكهربية فقط أثناء اتساخ العوازل بواسطة ترسبات شبه موصلة. وهذا الاتساخ للعوازل يحدث عادة على الخطوط المارة خلال مناطق صناعية في جوار مشروعات كيميائية وميتالورجية، على سواحل البحار وفي مناطق التربة الملحية. التزود بعزل يعول عليه في هذه الحالات يمثل مشكلة معقدة. طبيعة وشدة التلوث -وبالتالي- تأثيرهم على سلوك العزل يكون مختلفاً كثيراً -لذلك- لكي نُعطي توصيات عامة لاختيار العوازل للخطوط الهوائية التي تمر خلال مناطق ذات جو ملوث تكون غير ممكنة. من الممكن فقط أن نشير إلى أن العمل الذي يعتمد عليه لهذه الخطوط يُضمن باتخاذ أحد الإجراءات التالية:

١. استخدام السلاسل ذات العوازل الخاصة ذات الأسطح المطورة وبالتالي، مسار تسرب كبير [الفصل ٨].

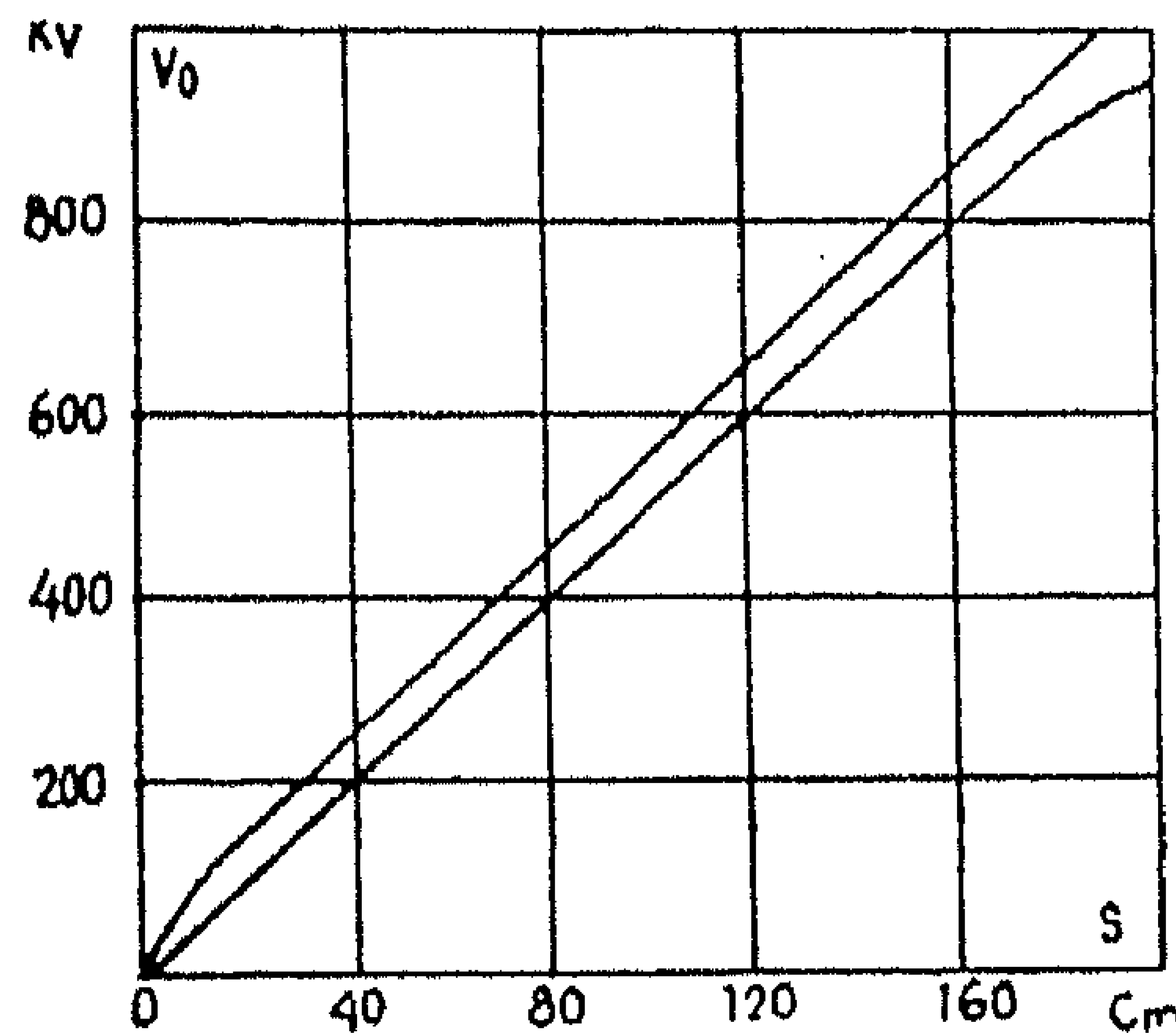
٢. التنظيف الدوري لأسطح العوازل.

٣. باستخدام سلاسل لها عدد كبير من العوازل ذات التركيب العادي.

وفي كل الأحوال فإن إقامة وتشغيل خطوط تمر خلال أجواء ملوثة يُصبح مكلفاً.

بالإضافة إلى ذلك فإن اختيار عدد العوازل يكون أساسياً أيضاً لتحديد أبعاد الحد الأدنى للثغرة الهوائية بين الموصلات والمنشآت المؤرضة. ومن الواضح، فإن هذه الثغرات يجب أن يكون

لها متانة كهربية ليست أقل من تلك الخاصة بالعوازل على الأقل. وإذا مر الخط العلوي بمنطقة ذات نشاط صواعق منخفض جداً ونادراً ما يتعرض لجهود زائدة جوية، فإن المتانة النبضية لعوازله عندئذ لن يكون لها أي أهمية. في هذه الحالات يتم اختيار الحد الأدنى المسموح للمسافات العازلة بحيث تكون متانته الكهربية لا تقل عن جهد الشرر المبلل للعوازل –أو بعبارة أخرى– على أساس مستوى الجهود الزائدة الداخلية. وكدليل تقريبي فإن هذه المسافات يمكن أن تقدر باستعمال العلاقة بين جهود الشرر والمسافات بين إلكترودات ثغرة هواء المستوى–العمود المعطاة في الشكل 6.10. الأمثلة معطاة في الجدول 6.4.



الشكل 6.10: جهد الانهيار عند تردد القدرة. المنحنى الأعلى ثغرة العمود–العمود، والمنحنى السفلي ثغرة المستوى–العمود

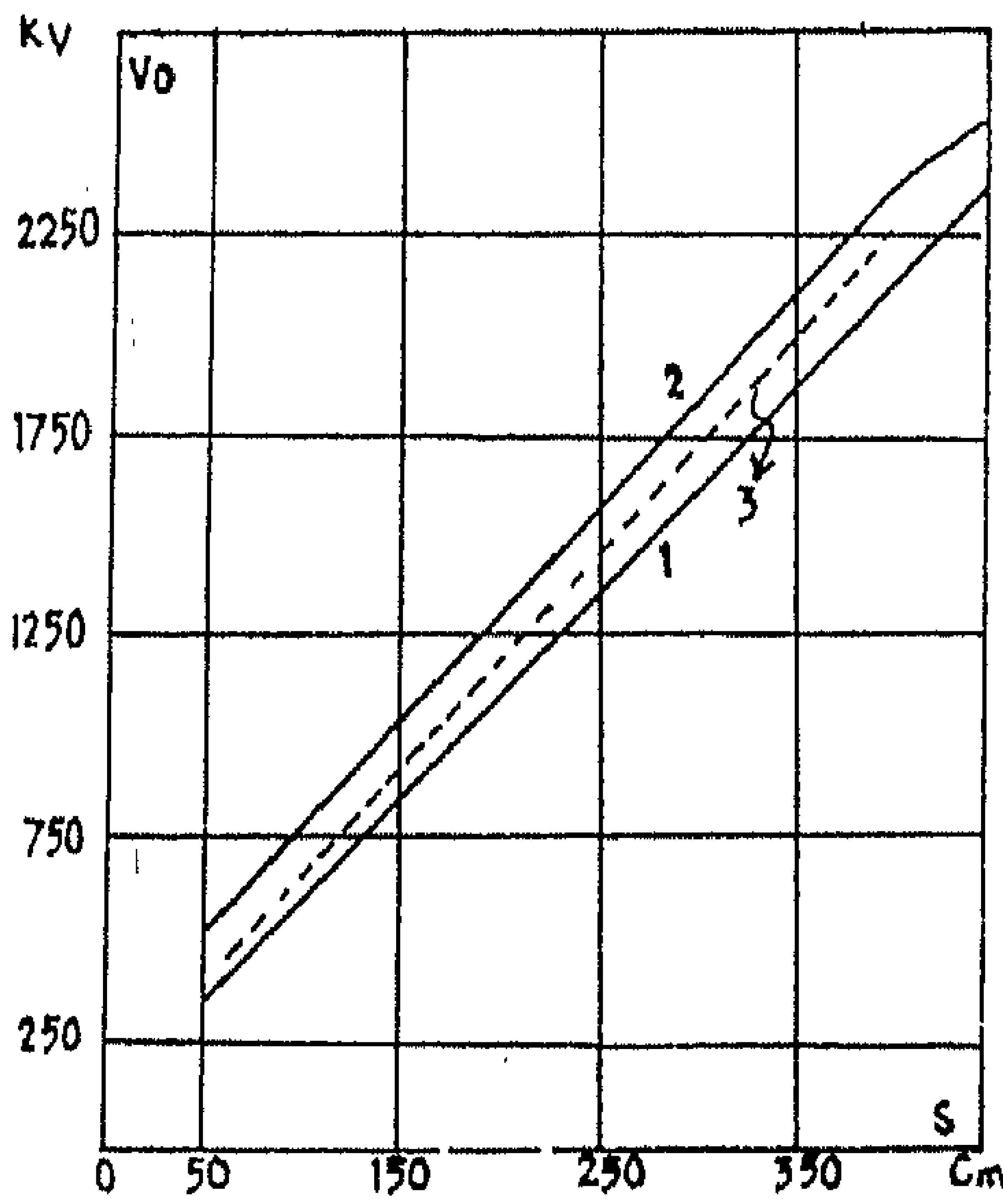
الجدول 6.4: الحد الأدنى لمسافات العزل المختارة حسب مستوى الجهود الزائدة الداخلية

الجهد الاسمى (kV)	35	110	150	220	330
عدد العوازل π-4, 5 في سلسلة	3	7	9	13	16
جهود الشرر المبلل لسلاسل العوازل π-4, 5	110	256	336	475	585
مكافئ ثغرة الهواء [حسب المتانة] لسلسلة من العوازل (cm) [الشكل 6.10]	27	72	93	135	175
أدنى مسافة مسموحة موصى بها (cm)	30	80	105	170	220

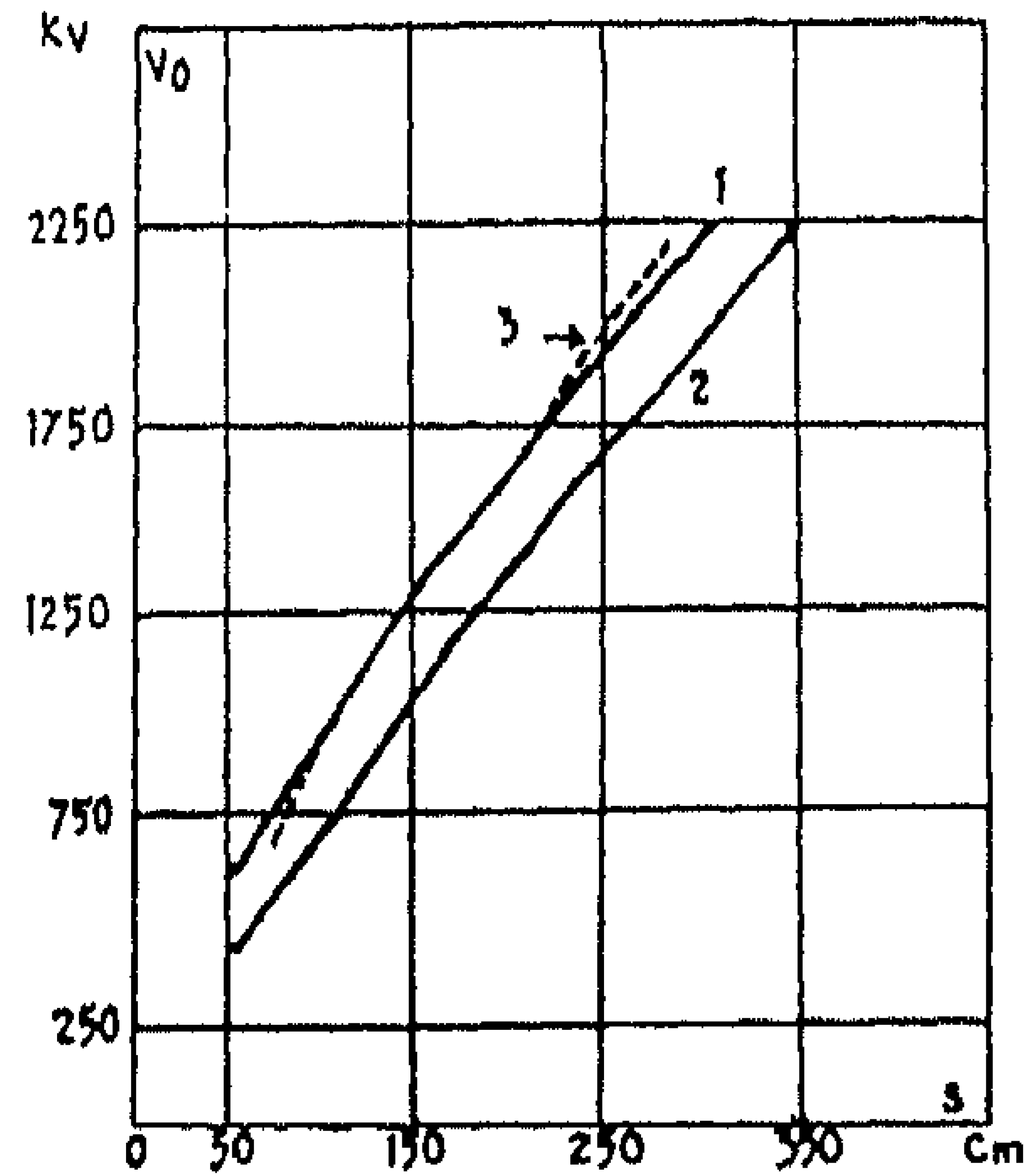
وفي الجدول 6.4 نرى أن الحد الأدنى من المسافات العازلة المسموحة بواسطة مجلس إدارة Govt. للطاقة قد تم زيادتها بحوالي %(15–10) مقارنة مع المسافات ذات جهود الشرر المساوية لجهود الشرر المبلل لسلاسل العوازل. الحاجة لمثل هذه الزيادة لثغرات العزل ترجع

إلى حقيقة أن المتانة الكهربية لهم أثناء الظروف الجوية السيئة يمكن أن تنخفض بحوالي (10–15)% عن جهود الشرر المبلل للسلاسل [الشكل 6.9].

في خطوط النقل المعرضة لجهود زائدة جوية فإن الثغرات الهوائية يجب أن يكون لها متانة نبضية ليست أقل من متانة العوازل. بيانات جهود الشرر النبضية للسلاسل التي لها عدد مختلف من العوازل معطى في الجدول 6.1. باستخدام هذه البيانات وعلاقة جهد الشرر النبضي 50% والمسافة بين إلكترودات ثغرة هواء المستوى–العمود [الشكل 6.11]، من الممكن إنشاء أبعاد دنيا لمسافات عزل الهواء [الجدول 6.5].



(a)



(b)

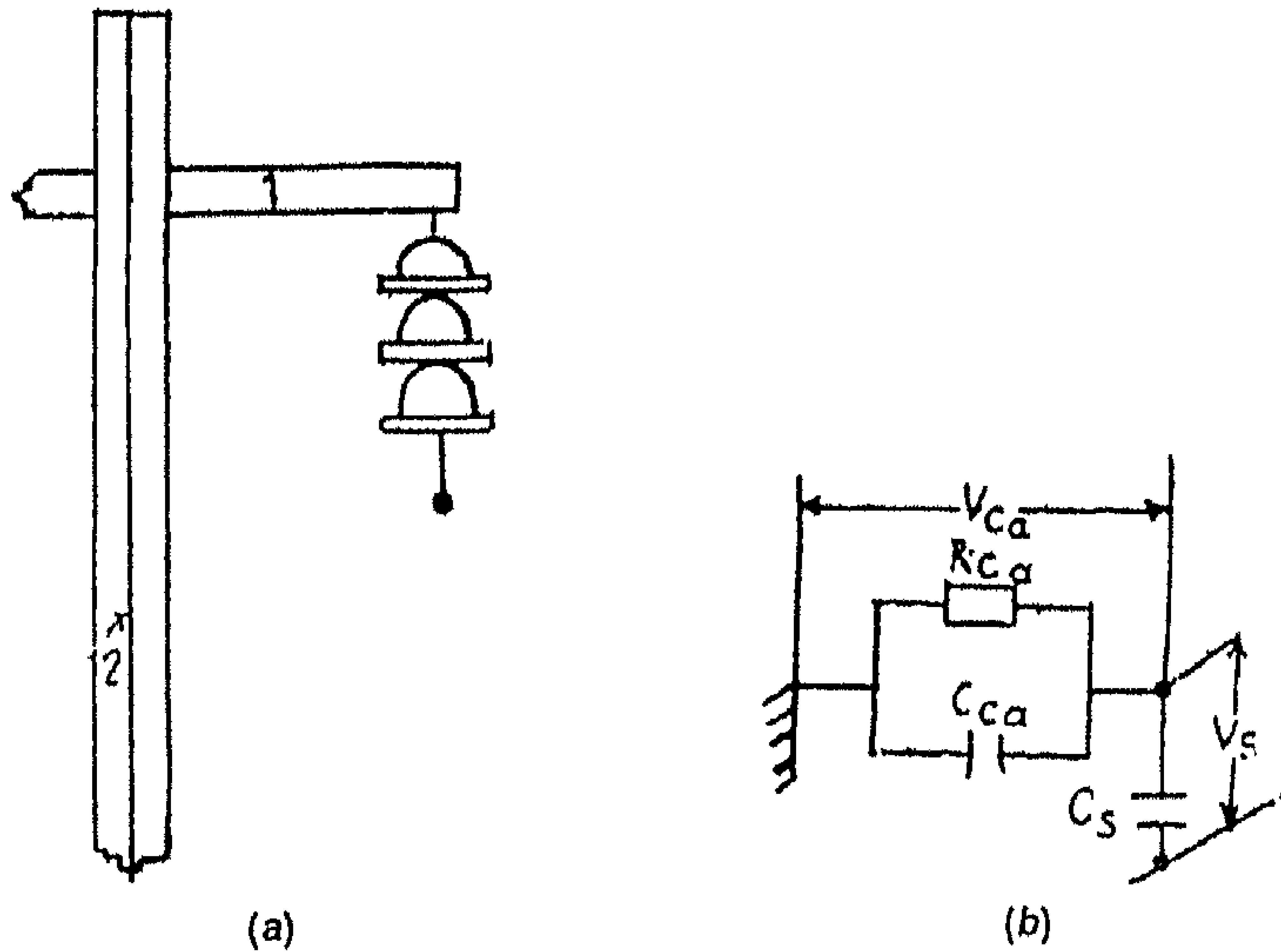
الشكل 6.11: جهد الانهيار النبضي الأدنى 50% عند موجة قياسية ذات قطبية موجبة (a) وسالبة (b). (1) المستوى العمودي؛ (2) العمود–العمود؛ (3) المستوى–الموصل

الجدول 6.5: الحد الأدنى لمسافات العزل المكافئة لسلسلة من العوازل حسب المتانة الدفعية

الجهد الاسمى (kV)	35	110	150	220	330
عدد العوازل π-4, 5 في سلسلة	3	7	9	13	16
جهد شرر دفعي لسلسلة عوازل (kV)	380	660	840	1140	1440
مكافئ ثغرة الهواء لسلسلة من العوازل حسب المتانة الدفعية (cm)	...	90	130	180	230
أدنى مسافة مسموحة موصى بها (cm)	45	115	150	210	255

٦-٤ استخدام الخواص العازلة للخشب Utilization of the Insulating Properties of Wood

استخدام الخواص العازلة للدعامات الخشبية تعطي مزيداً من المتانة النبضية للعزل. وتتصرف الأخشاب جيدة الجفاف مثل عازل كهربي يمتلك متانة كهربية عالية نسبياً. ومع ذلك، فبسبب المسامية والاسترطابية، فإنه يحتوي دائماً على كمية من الماء %(40-15). وتعتمد رطوبة الأخشاب على الظروف الجوية ويمكن أن تختلف في حدود معينة. وبذلك فإن مقاومتها الكهربية يمكن أن تختلف أيضاً عبر مدى واسع. ويعتمد سلوك المنشآت الخشبية ليس فقط على المقاومة الكهربية لها بل أيضاً على نوع الجهد المؤثر. فمع جهد تردد قدرة أو الجهود الزائدة الداخلية تعتبر المنشآت الخشبية -في الغالب- كمقاومات وليس كعازل. وبالنسبة للجهود النبضية يتصرف الخشب بطريقة أخرى. وحتى في الظروف الرطبة يمكن أن يحدث به شرر بواسطة جهود نبضية، أي يسلك كعازل.



الشكل 6.12: الدائرة المكافئة لعزل مشترك يتكون من عوازل وأذرع مستعرضة خشبية.
(1) ذراع مستعرض خشبي؛ (2) سلك تأريض ممدد بطول القطب الخشبي

في المنشآت الحقيقية توصل العناصر الخشبية [الأذرع المستعرضة للدعامات] دائماً على التوالي مع عوازل البورسلين. ومع ذلك، فإن المتانة النبضية الكلية لهم تكون أصغر من المجموع الحسابي لمتانات العوازل والمقاطع المناظرة من المنشأ الخشبي للدعامة، حيث إن الجهد يكون غير موزع بينهم بنسب متاناتهم الكهربية ولكن بطريقة أكثر تعقيداً. وسنشرح

ذلك بمساعدة دائرة مكافئة مبسطة موضحة في الشكل 6.12. في هذا المخطط C_S هي سعة السلسلة، C_T ، R_T هما سعة ومقاومة تسرب الذراع المستعرض على التوالي. مقاومة التسرب عبر العوازل تكون عادة أكبر كثيراً من R_T ، ولذلك يمكن إهمالها بأمان. وبالمثل يمكن إهمال سعات العوازل بالنسبة للأرض. وسنرى الآن كيف يتوزع الجهد النبضي بين قطاعين من العزل، السلسلة والذراع المستعرض. وللتبسيط سوف نفترض أن الجهد النبضي له جبهة حادة مطلقة $\tau_f = 0$.

بالنسبة لأي لحظة من الزمن، من الواضح أن:

$$V_i = V_S + V_T$$

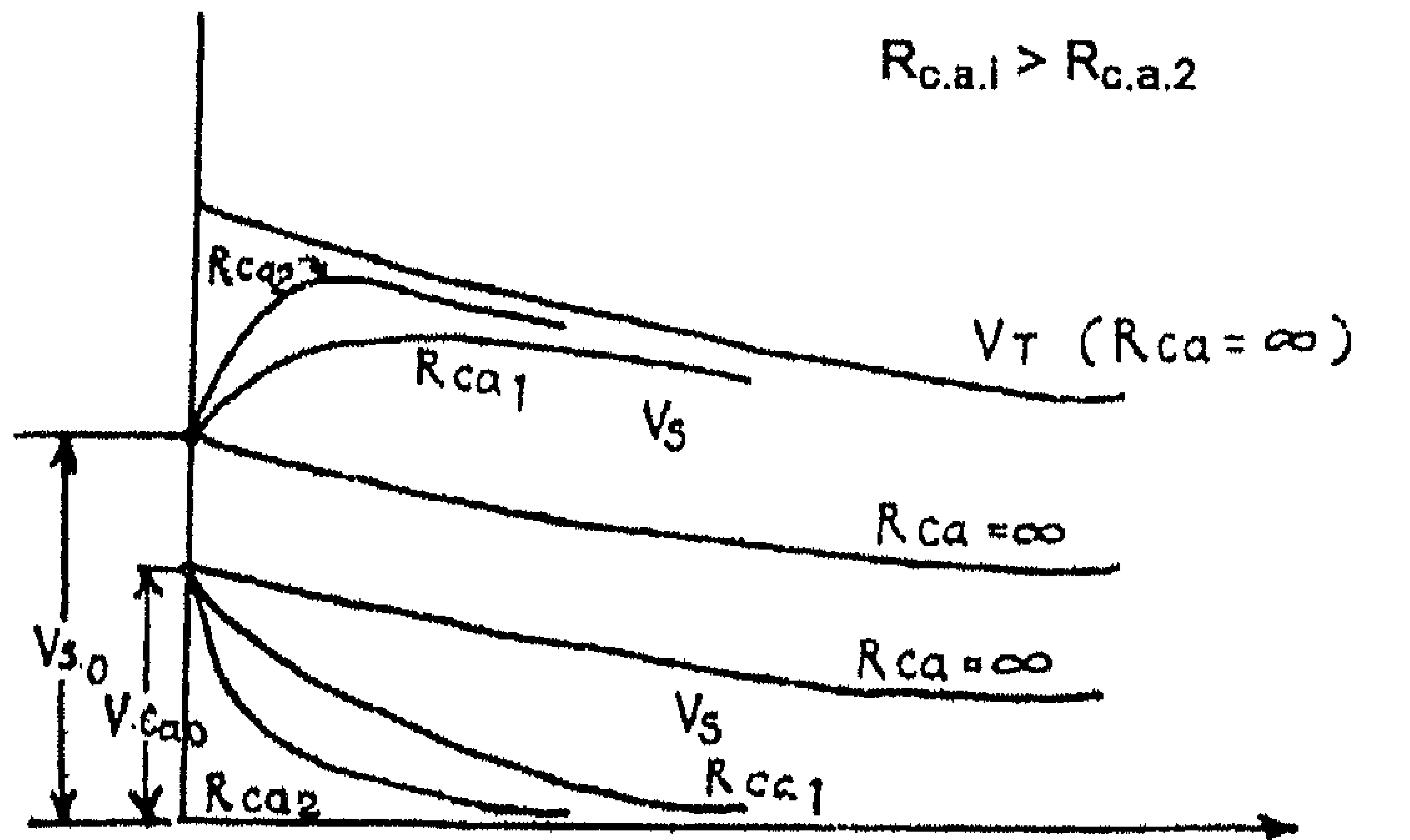
توزيع الجهد عند اللحظة الابتدائية $t = 0$ يحدد بواسطة السعات فقط ولذلك:

$$V_{S_0} = V_i \frac{C_T}{C_S + C_T}$$

$$V_{T_0} = V_i \frac{C_T}{C_S + C_T}$$

وهو يُحفظ فقط عند $R_T = \infty$. وحيث $R_T \neq \infty$ [دائماً] فإن إعادة توزيع الجهد يحدث بحيث إن كسر الجهد الحادث على سلسلة العوازل [الشكل 6.13] يتزايد. ويحدث إعادة التوزيع مع ثابت زمني يساوي:

$$T = R_T (C_S + C_T)$$



الشكل 6.13: تغير الجهد على السلسلة والذراع المستعرض تحت تأثير جهد نبضي

وكلما صغرت T، مال الجهد سريعاً للوصول إلى الصفر وكبرت ذروة V. وبالنسبة لقيم صغيرة جداً من R_T ، أي بالنسبة للخشب المُرطب، فإن أقصى V_S سوف لا تختلف عملياً عن قيمة ذروة amplitude للنبض المؤثر. لذلك، فإن المتانة الكهربية للعزل المشترك –في هذه الحالة– لن تكون مختلفة عن متانة سلسلة واحدة. ومع ذلك، فإن هذا الترطيب القوي –كما أظهرت التجربة– يحدث نادراً. وكقاعدة، فإن العناصر الخشبية لدعامة تأخذ على نفسها كسر كبير من الجهد وبذلك تزداد المتانة النبضية للعزل.

أثناء تصميم العزل المشترك، يكون أساسياً تقدير المتانة النبضية الإضافية التي تعطيها العناصر الخشبية للدعامة. مما سبق نرى أنها لا تساوي المتانة الكهربية للمنشأ الخشبي نفسه. فمن الممكن تحديدها فقط بمقارنة جهود الشرر النبضية للسلسلة المقاسة منفصلة والسلسلة مع ذراع مستعرض خشبي. ومع ذلك، فإن هذه المقارنة تعطي تفرق كبير والذي يشرح ظاهرياً بالتغير الكبير في رطوبة الخشب. بالنسبة للحسابات المبدئية، يوصى بأخذ متانة نبضية إضافية مزودة بذراع خشبي مستعرض تساوي 100 kV لكل متر طول من مسار التفريغ عبر هذا الذراع المستعرض. فمثلاً، في حالة الدعائم الخشبية لخط 110 kV [الشكل 6.1] سيساوي جهد الشرر النبضي 50% عبر المسار $m\text{-}k\text{-}m\text{-}m$ الآتي تقريباً:

$$V_{50\%} = 2V_{s\ 50\%} + 100\ l_{kk} = 2\times 645 + 100\times 4 = 1690\ \text{kV}$$

حيث $V_{s\ 50\%} = 645\ \text{kV} - 50\%$

جهد الشرر لسلسلة من 7 عوازل من الطراز π-4, 5.

$l_{kk} = 4$ m = طول الذراع المستعرض $k\text{-}k$.

جهد الشرر النبضي عبر المسار $n\text{-}n\text{-}s$:

$$V_{50\%} = V_{nn\ 50\%} + 100 l_{ns}$$
$$= 720 + 100\times 11.2 = 1820$$

حيث $V_{nn\ 50\%} = 720\ \text{kV} - 50\%$

جهد الشرر النبضي للثغرة $n\text{-}n$.

$l_{ns} = 11.2$ m = طول $n\text{-}s$ من عمود الدعامة.

القيم المعطاة لجهد الشرر هي قيم دنيا. ويمكن زيادتها إذا كان الخشب جافاً.



عوازل أجهزة المحطة

Station-Apparatus Insulators

٧-١ عوازل العمود Post Insulators

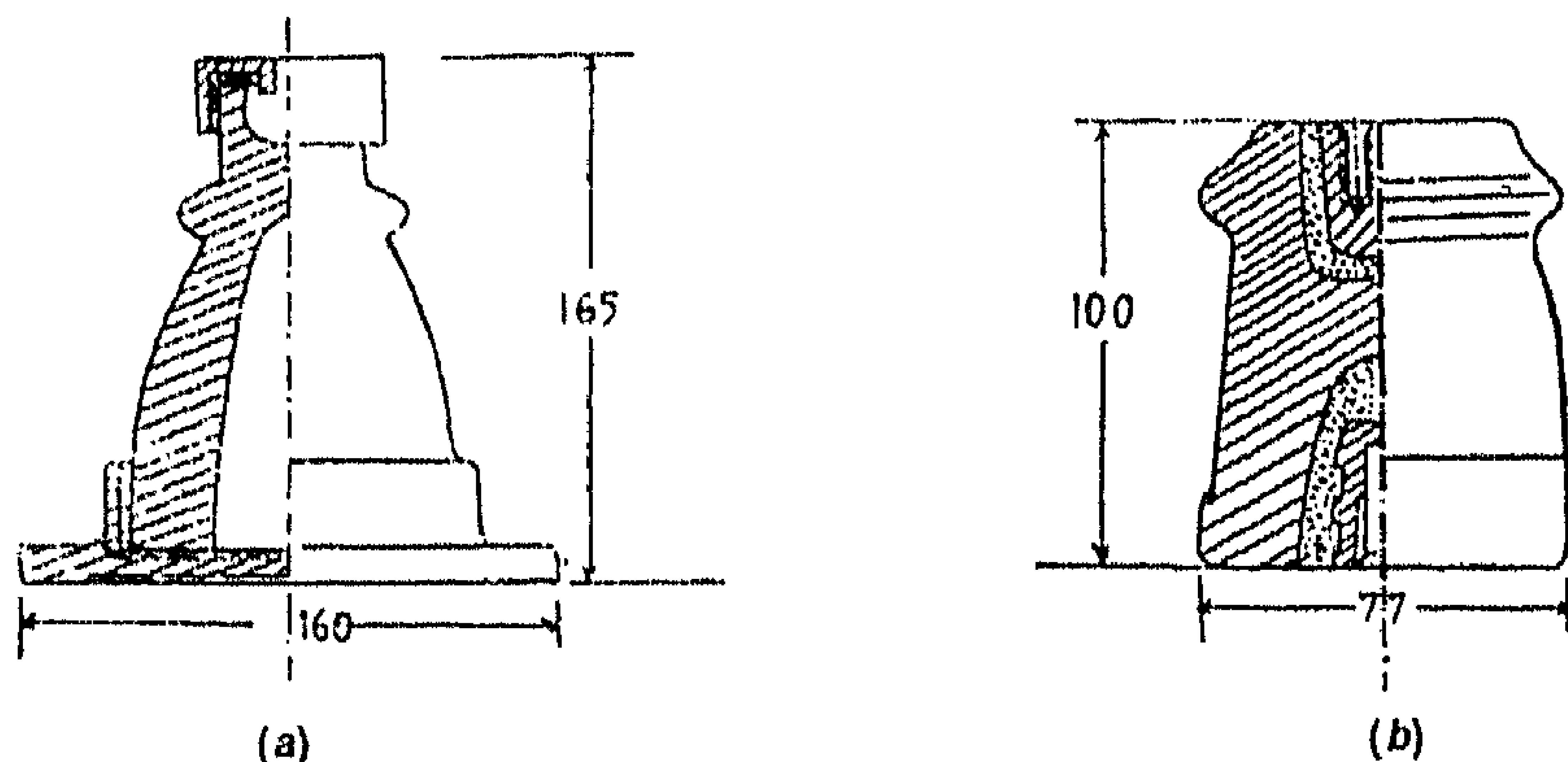
تقسم عوازل أجهزة المحطة إلى مجموعتان مختلفتان في التركيب والواجب: هي عوازل العمود والمدخل [الجلب]. عوازل العمود تخدم غرض العزل الكهربي والتثبيت الميكانيكي لقضبان التوزيع العمومية الحاملة للتيار في شبكات التوزيع وللأجزاء الحاملة للتيار من الأجهزة الكهربية. عوازل المدخل [الجلب] تُستخدم لتقديم جهد داخل الخزانات المعدنية للمحولات، قواطع الدائرة الزيتية، المكثفات وأجهزة أخرى [عوازل مداخل الأجهزة] وبالمثل لعزل قضبان التوزيع العمومية أثناء مرورها خلال جدران شبكات التوزيع [عوازل مدخل طراز المحطة]. عوازل المدخل طراز الأجهزة تسمى غالباً "عوازل السلك الواصل" أو "الجلب" bushings.

٧-١-١ عوازل العمود الاسطوانية Cylindrical Post Insulator

وهي تستخدم لمعدات التوزيع داخل المباني ذات kV (3–10) ولها الشكل الأبسط. في الشكل 7.1 موضح عوازل 6 kV وهي تختلف عن بعضها في طريقة التزود بالتركيبات المعدنية. أحدهم [مسلسل O] هي جسم بورسلين أجوف ذو شكل اسطواني. ويصنع الجزء العلوي من العازل صلباً ليمنع حدوث التفريغ في التجويف الداخلي. ويقوى البورسلين عند القاع بمساعدة أسمنت بواسطة شفة من الحديد الزهر وعند القمة بواسطة غطاء حديد زهر.

في عازل آخر [مسلسل OM] يوضع جزء البورسلين الصلب قريباً من المنتصف، والتجاويف العلوية والسفلية تستخدم للتزود بالتركيبات. مثل هذا العازل ليس لديه تجاويف داخلية. وتركيباته لا تبرز عملياً فوق حواف البورسلين. عازل المسلسل OM ذات التزود

الداخلي بالتركيبات يختلف عن عوازل المسلسل O بميزة الأبعاد الأصغر والوزن الأصغر للبورسلين وخاصة التركيبات.



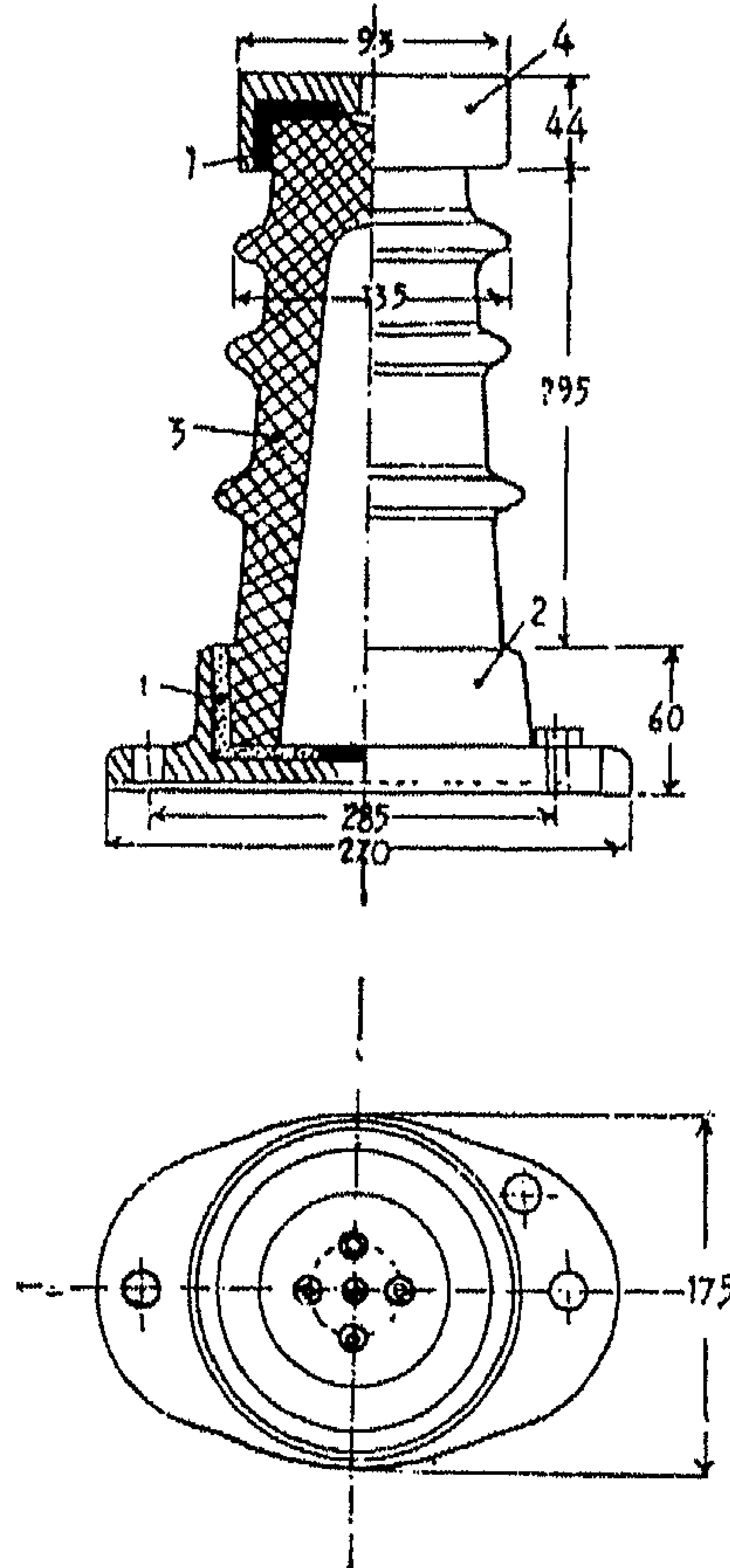
الشكل 7.1: عوازل عمود للاستخدام عند 6 kV . (a) عوازل OA -6 ؛ (b) عوازل OMA -6

عوازل الجهد kV (10–3) تصنع بمتانات ميكانيكية مختلفة تحت الانحناء. في طبقات العوازل، تسمى المتانة الميكانيكية بحروف A ، 6 ، B ، Д تضاف إلى تسمية المسلسل. الحرف A يعني متانة مضمونة تحت انحناء 375 kg، kg (750–6)، $B-1250$ kg ، $A-2000$ kg .
فمثلاً العازل 6– OA من المسلسل O لجهد 6 kV مع متانة ميكانيكية مضمونة تحت الانحناء 375 kg . العوازل الخاصة بنفس الجهد مع اختلاف المتانات الميكانيكية تختلف عن بعضها في القطر فقط.

عوازل العمود من طراز القضيب لجهد 35 kV [الشكل 7.2] لها شكل معقد إلى حد ما. وحيث إن العازل مخصص للتركيب الداخلي، فإن التجعدات على أسطحه تكون قليلة جداً ومعينة لبعض الزيادة في جهد الشرر تحت الجهود النبضية وتحت جهود تردد القدرة.

في الشكل 7.3 موضح تغير شدة الشرر المتوسطة لعازل كدالة مع موقع التجعدات على سطحه. هذه القيم مرتبطة مع شدات الشرر لعزل مماثل بدون تجعدات. وكما نرى من المنحنيات يكون تأثير التجعدات محسوساً فقط عند أوقات التفريغ الكبير. وهنا يلاحظ أكبر زيادة في جهد التفريغ في تلك الحالة عندما يكون التجعد قريباً من ذلك الخاص بالإلكترودات التي يبدأ منها التفريغ. ولموجة ذات قطبية موجبة يكون هذا الإلكترود هو الغطاء [إلكترود علوي]، وبالنسبة لموجة ذات قطبية سالبة تكون الشفة flange. وحيث إنه بالنسبة لعوازل العمود –وأيضاً في ثغرات الهواء– يكون جهد الشرر لموجة موجبة القطبية، أقل من ذلك الخاص

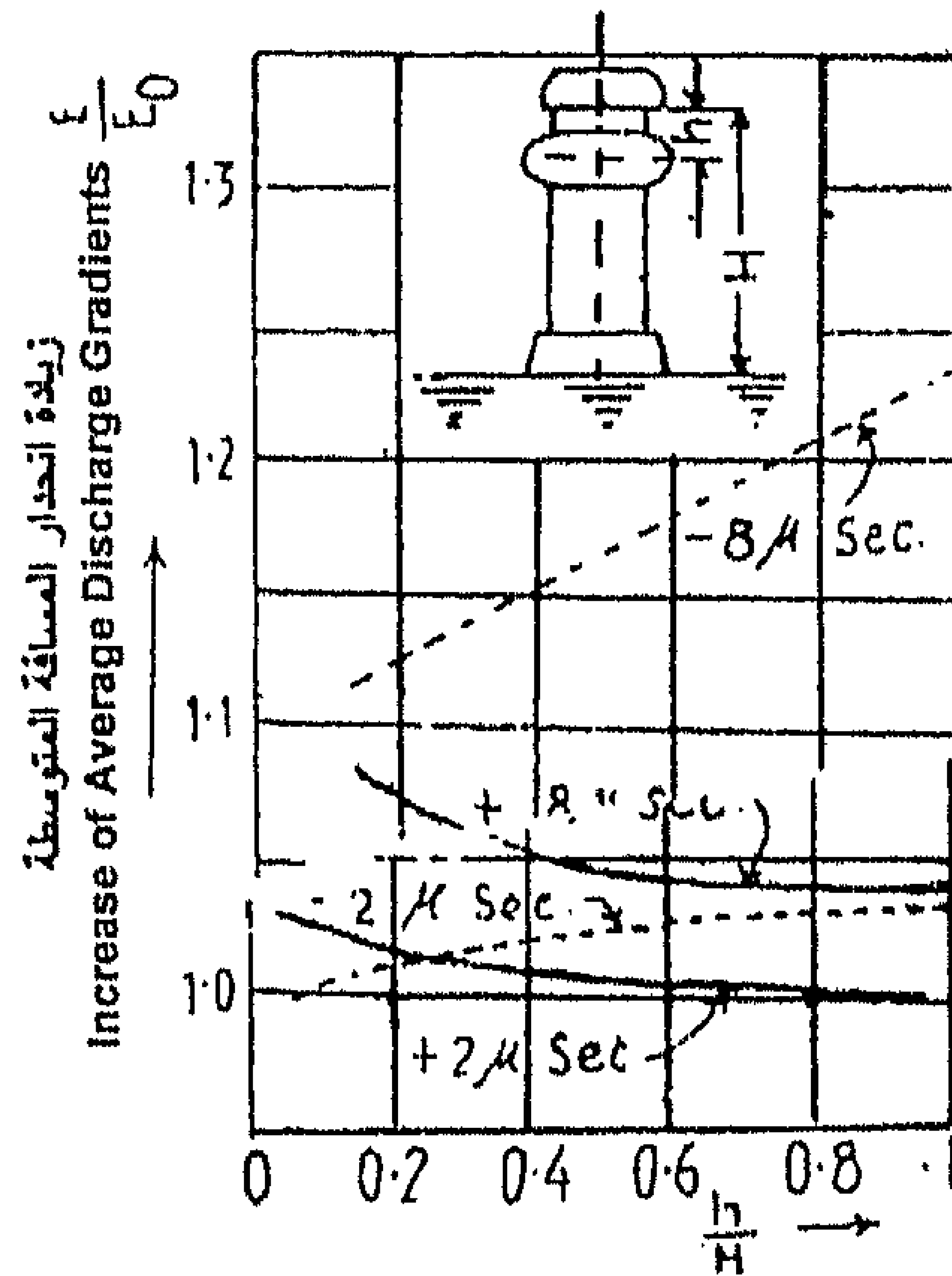
بموجة سالبة القطبية، يكون أساسياً وضع التجعدات قريبة من الغطاء cap لكي نزيد من جهد شرر القطبية الموجبة.



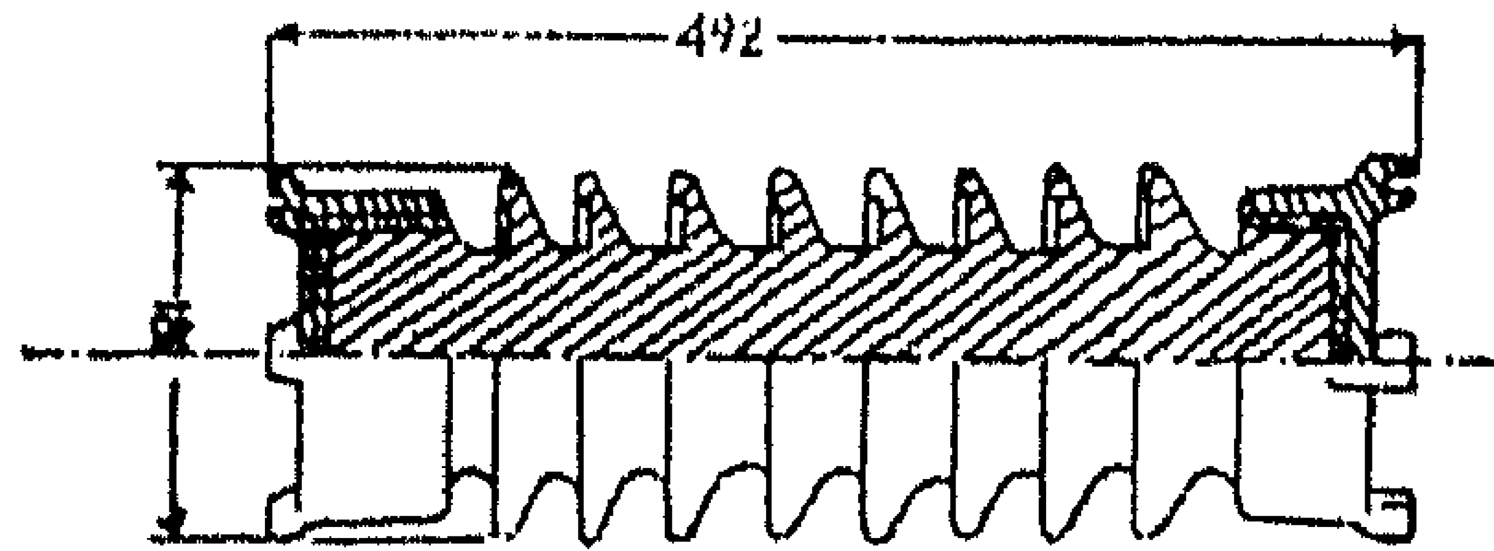
الشكل 7.2: عازل عمود اسطواني يستخدم عند 35 kV . (1) أسمنت؛ (2) شفة؛ (3) بورسلين؛ (4) غطاء

عوازل العمود الاسطوانية المستخدمة في شبكات التوزيع الخارجية تختلف في استخدام التجعدات على سطحها الجانبي، التجعدات تخدم غرض زيادة جهد الشرر لها في ظروف الأمطار. وتحدد جهود الشرر المبلل أساساً بواسطة مسافات الشرر للعازل وعدد وأبعاد تعرجاتها. أعلى قيمة لجهد الشرر المبلل لمسافة شرر معطاة نحصل عليه في تلك الحالة عندما يكون فرق أنصاف أقطار التجعدات وجسم العازل يساوي المسافة بين التجعدات.

ولجهود 35 kV تُصنع عوازل للتركيبات الخارجية على شكل اسطوانات بورسلين صلبة. يوضح الشكل 7.4 تركيب مثل هذا العازل لـ 35 kV .



الشكل 7.3: تأثير موضع التجعدات على عازل العمود على جهد الشرر النبضي له

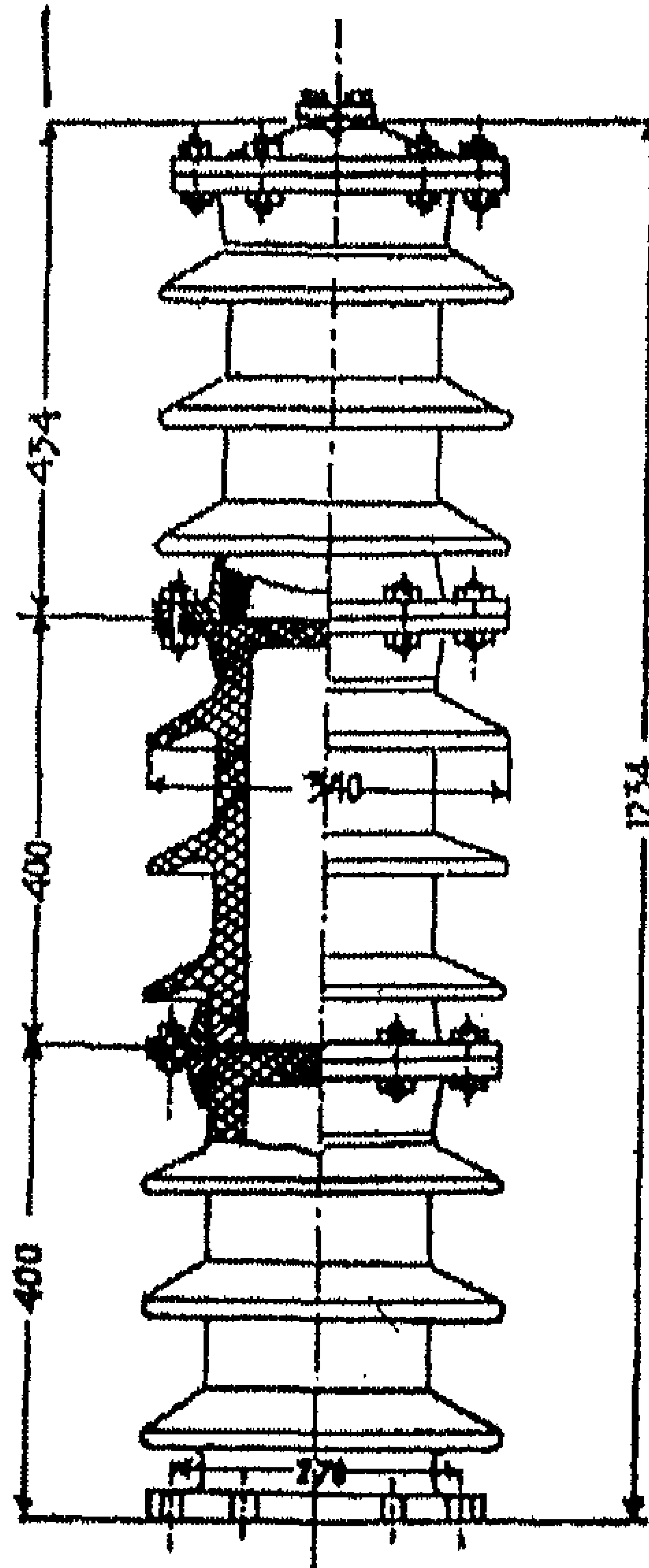


الشكل 7.4: عازل عمود اسطواني CO-35 لجهد 35 kV

ولجهود 110 kV وما فوقها، تستخدم أعمدة مركبة من عوازل قليلة لجهود أصغر وموصلة فيما بينها بمساعدة تركيبات معدنية. وحيث إن الأحمال الميكانيكية على عازل تزداد بزيادة الجهد الاسمي، فعند 150 kV فإن عوازل البورسلين الصلبة لا تضمن المتانة الميكانيكية الضرورية تحت الانحناء. لذلك، بالنسبة لأعمدة التدعيم عند جهد أعلى من 110 kV [وأحياناً عند 110 kV] تصنع عوازل العمود مجوفة ولكن ذات قطر أكبر. وهذا يزيد من المتانة الميكانيكية للعازل تحت الانحناء bending.

عيب العوازل المجوفة والذي يعوق الاستخدام الواسع لهذه العوازل الأخف والاقتصادية في التركيبات الخارجية، هو إمكانية حدوث تفريغات في التجويف الداخلي. الرطوبة التي تهبط بشكل عارض في التجويف الداخلي للعازل يمكن أن تسبب تفريغات داخلية على جدرانه الداخلية حتى عند جهد التشغيل. وهذه التفريغات تسبب انخفاض حاد في جهد التفريغ داخل

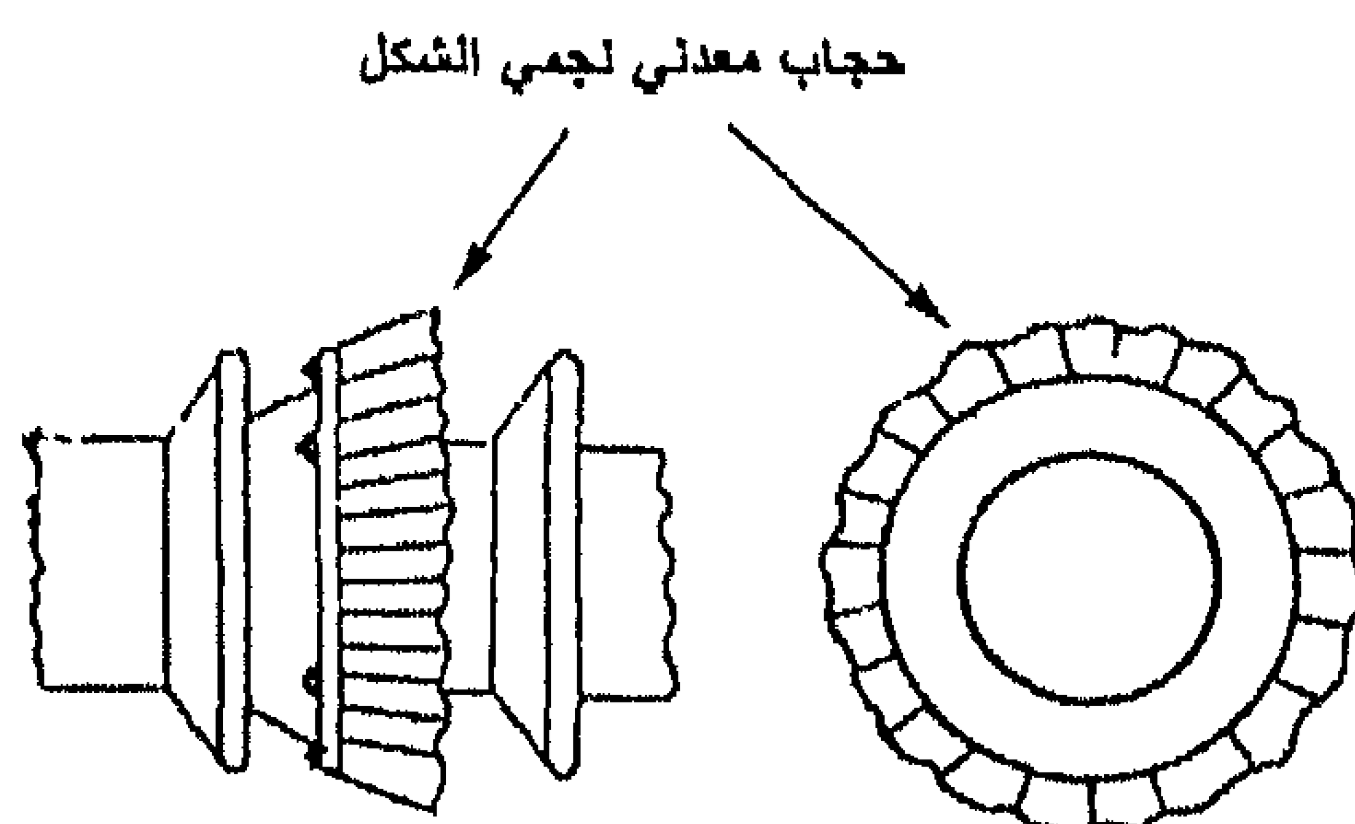
الفجوة. الإجراء الذي يحول الأنظار عن التفريغ داخل العمود هو تركيب فواصل بورسلين ذات سمك كافي [الشكل 7.5]. أحياناً بدلاً من فواصل البورسلين لمنع تفريغات التجويف الداخلي – يملأ بمركب أو زيت محولات. ومع ذلك، في هذه الحالة يجب أن يكون العازل محكم الغلق جيداً لمنع الزيت أو المركب من التسرب إلى الخارج.



الشكل 7.5: عمود من عوازل العمود المجوفة لاستخدام 110 kV

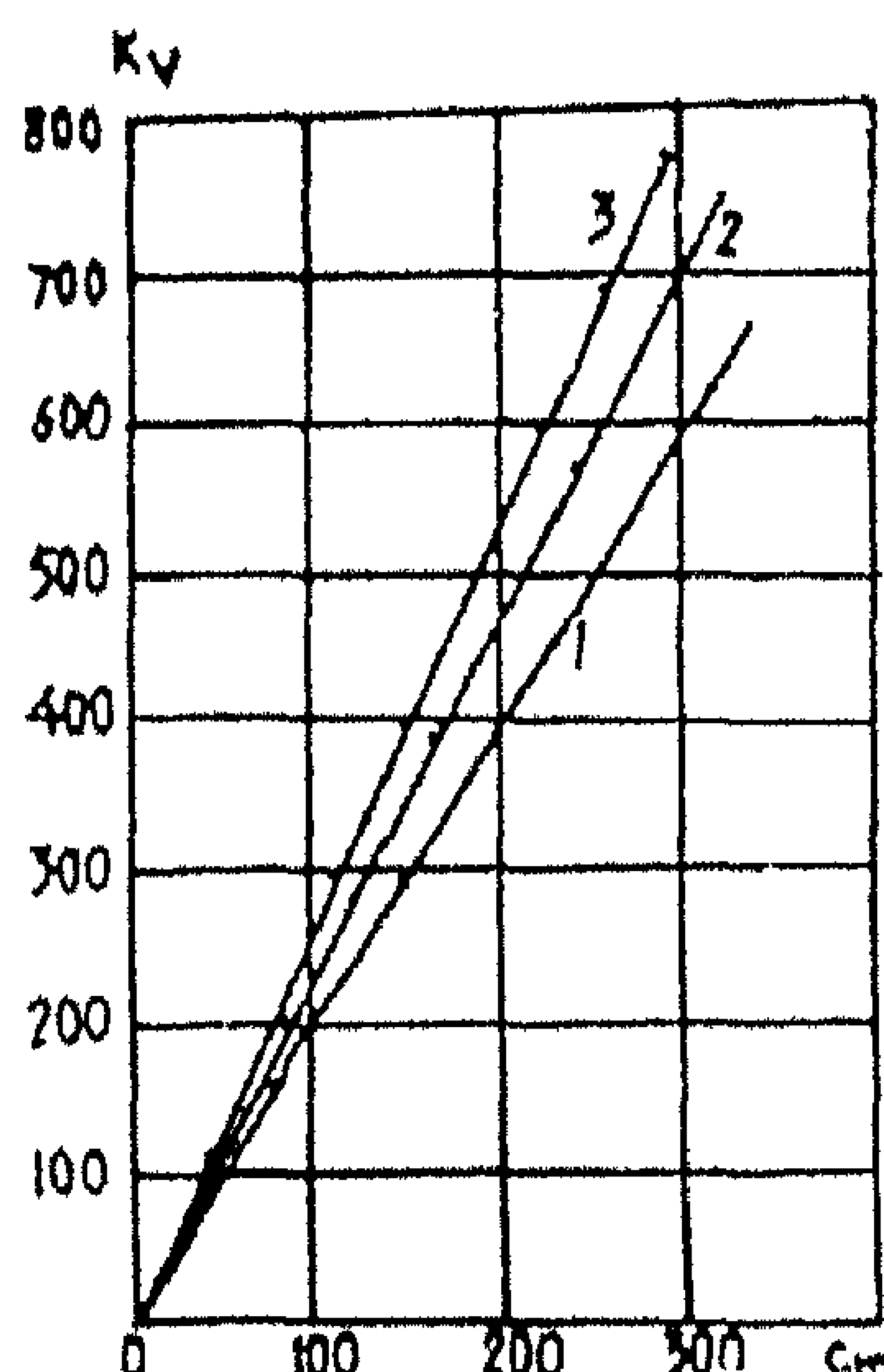
الأعمدة العالية من عوازل العمود الاسطوانية وطبقاً لاقتراح G.A. Lebedev تزود بحواجب معدنية نجمية تثبت على التركيبات عند وصلة العازل [الشكل 7.6]. وهذا الإجراء البسيط يسمح بزيادة جهد الشرر المبلل بشكل ملحوظ لأعمدة العوازل.

كمية الماء المتدفق بطول عوازل العمود لا تكون متساوية عبر ارتفاعه. وكلما قصر العازل ازداد الماء المتدفق عليه. وهذا يؤدي إلى ازدياد شدة عدم انتظام توزيع الجهد بطول العوازل، ونتيجة لذلك، يتم تخفيض جهد الشرر الكلي لعمود العوازل مقارنة مع جهود الشرر المبلل للعوازل المنفردة الداخلة في العمود [الشكل 7.7 المنحنى 1، 3].



الشكل 7.6: الحجاب النجمي وطريقة تركيبه في عمود من العوازل

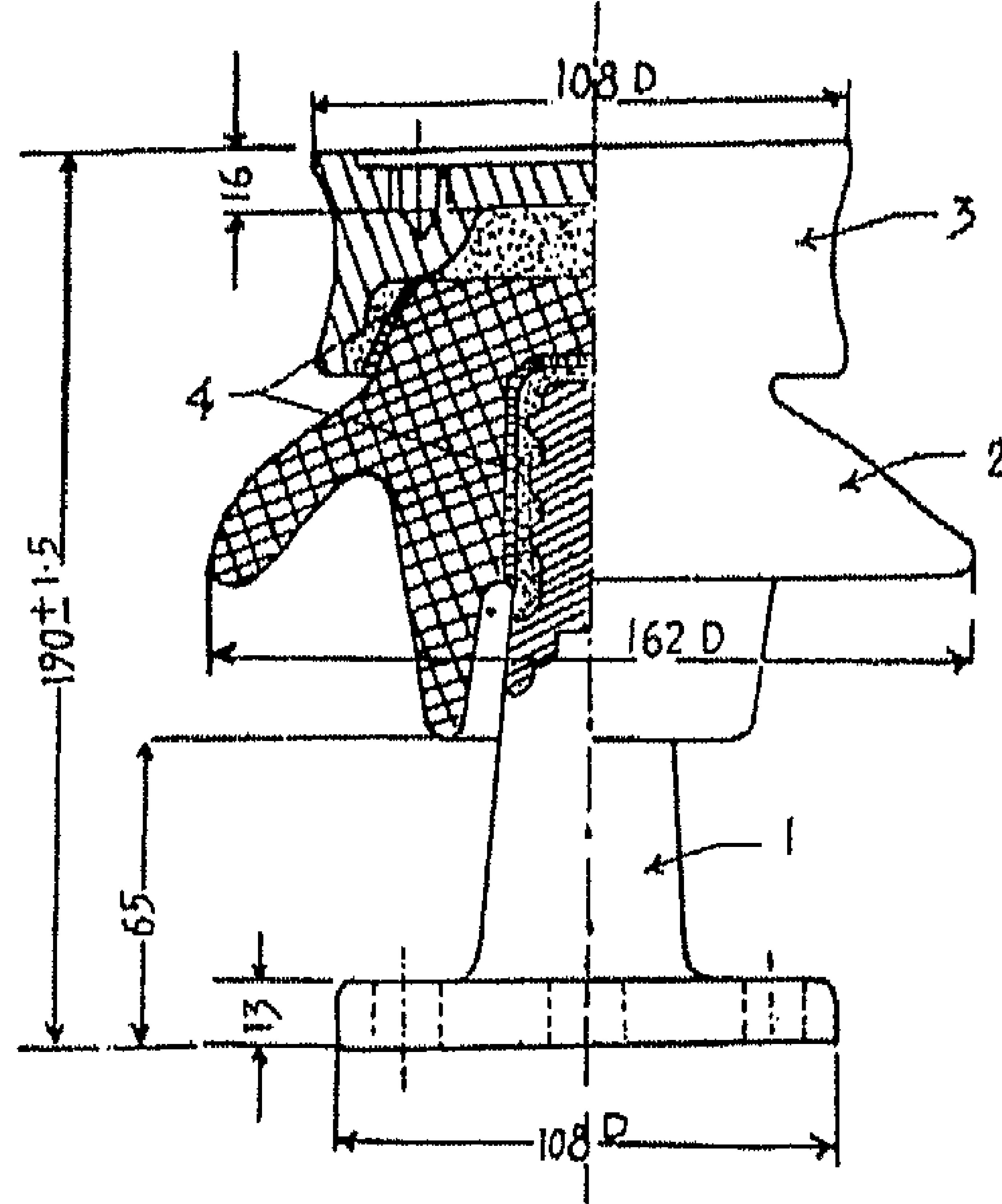
ومع تركيب النجمة وبسبب الشكل الجانبي الخاص لهم يتقطع التدفق المستمر للماء إلى تدفقات منفصلة وتُرش بعيداً عن سطح العازل. الشدة العالية للمجال الكهربي عند حواف النجمة والتي لها مركبة عمودية على محور العازل تحسن من رش التدفقات. جهد الشرر الإجمالي لعمود من العوازل ذات نجوم يقترب من مجموع جهود الشرر المبلل للعوازل المنفصلة [الشكل 7.7 منحنى 2]. عند جهد شرر مبلل معطى فإن تركيب النجوم يسمح بتخفيض ارتفاع عمود العوازل.



الشكل 7.7: جهد شرر أعمدة من عوازل العمود طراز OC-35 مع وبدون نجوم. (1) جهد الشرر الإجمالي لعمود العوازل؛ (2) جهد الشرر المبلل للعوازل منفردة؛ (3) جهد الشرر بدون نجمة

٧-١-٢ عوازل العمود من النوع المِسْمَاري Pin Type Insulators

وهي تستخدم أساساً في التركيبات الخارجية. وهي تصنع لمدى جهد (35–3) kV ولجهود أعلى فإن العوازل المسمارية –مثل العوازل الاسطوانية– تركب في أعمدة تتكون من: ثلاثة عوازل 35 kV عند جهد 110 kV، وأربعة عند جهد 150 kV، ومن خمسة عند 220 kV .



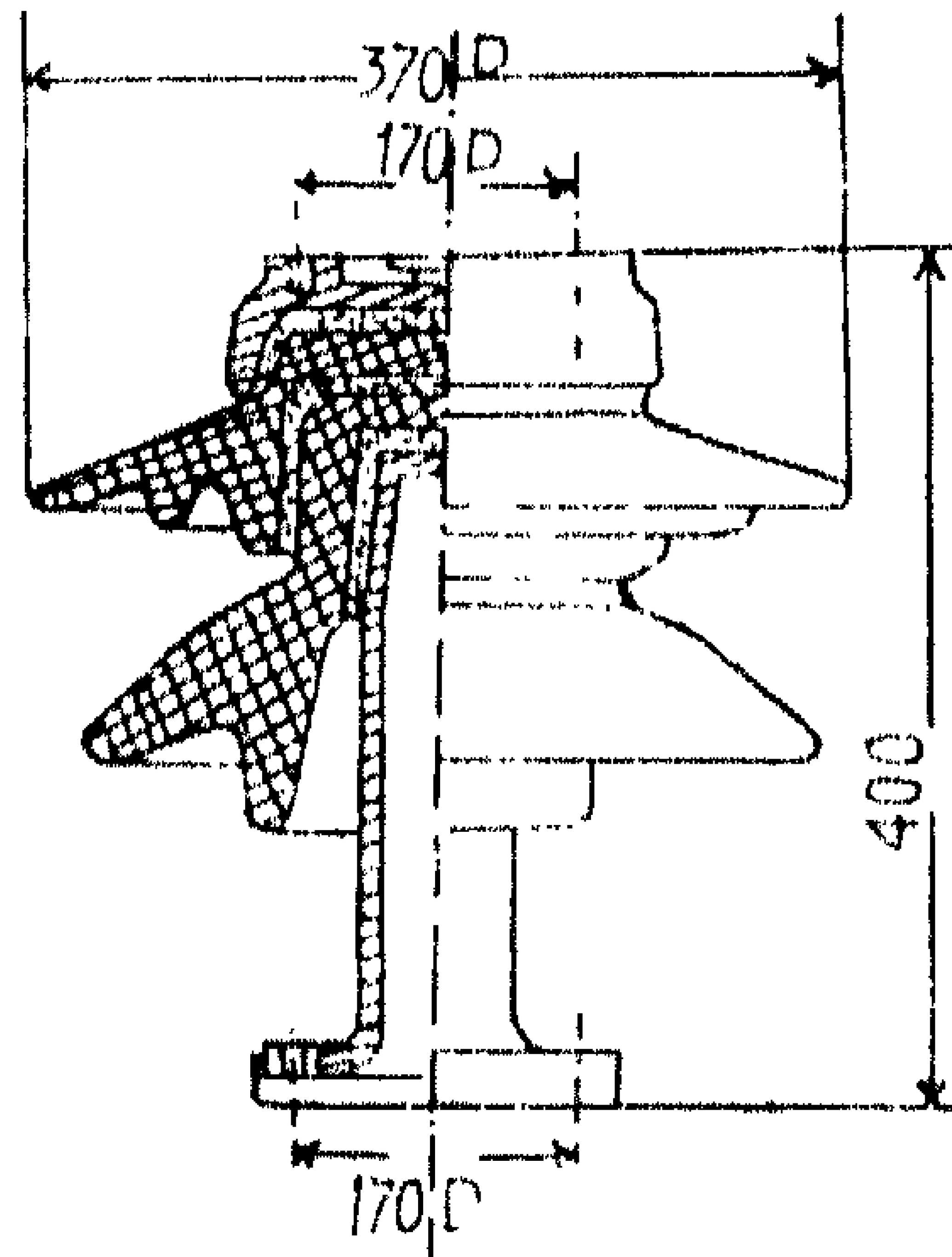
الشكل 7.8: عازل عمودي مسماري لـ 10 kV . (1) مسمار؛ (2) بورسلين؛ (3) غطاء؛ (4) أسمنت

في الشكل 7.8 موضح عازل عمود مسماري الطراز لـ 10 kV . الجزء البورسلين لعازل الخط المسماري يكون مشابهاً في التركيب لعوازل الخط المسمارية –ولكن– على النقيض لعوازل الخط، فإن عوازل العمود للطراز المسماري تربط بتركيبات معدنية بمساعدة أسمنت. وللتوصيل [الترابط] الدائم للبورسلين مع الغطاء والعمود، فإن أسطح الأسمنت التي ستقوى تغطى بتجعدات بورسلين، وتتحقق مرونة العازل بتغطية أسطح البورسلين والتركيبات الملامسة للأسمنت بالبيتومين. غياب طبقات البيتومين بين أجزاء العازل والأسمنت يؤدي إلى التشقق السريع للبورسلين في رأس العازل.

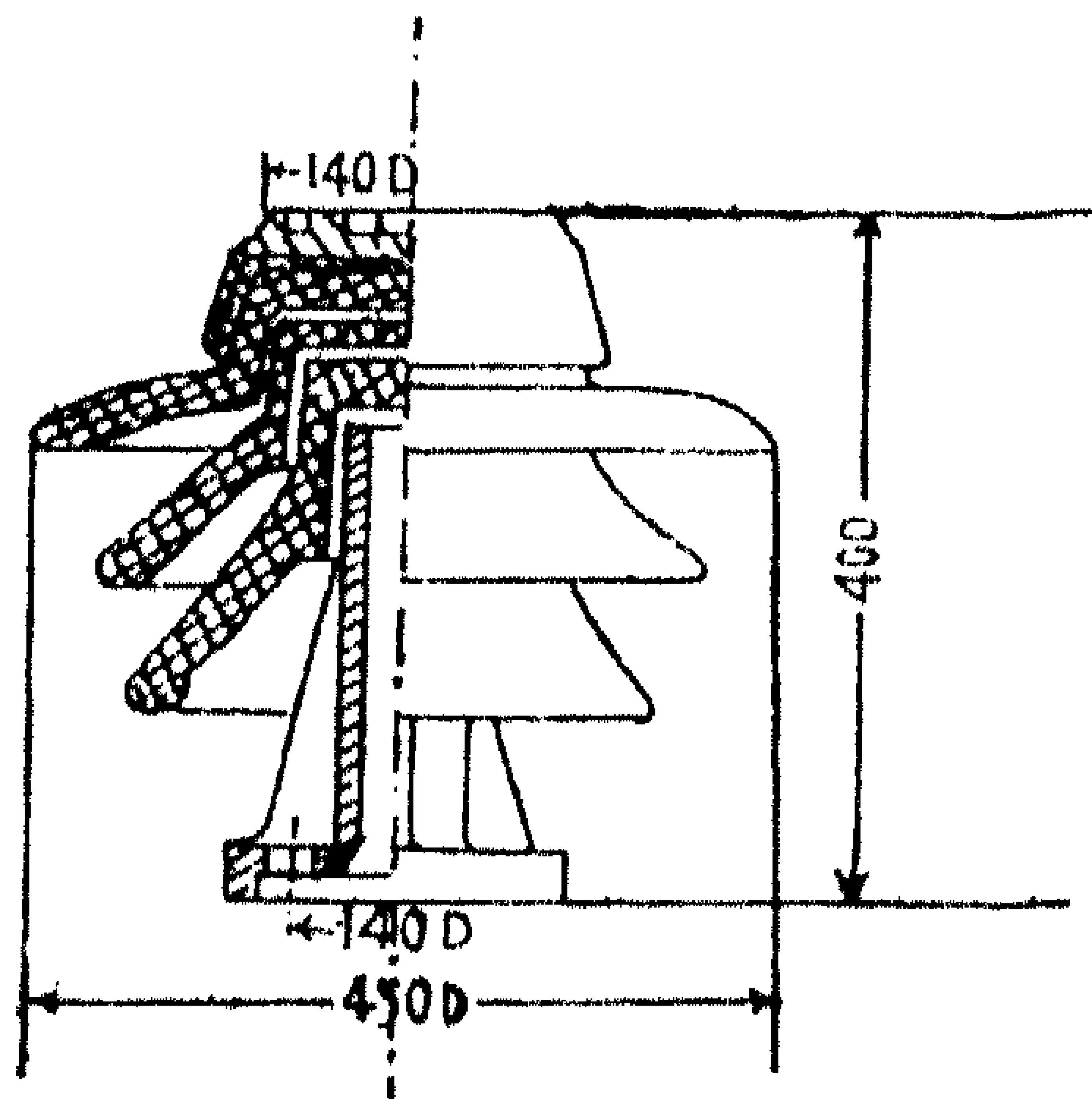
عوازل العمود المسمارية لـ 35 kV [الشكل 7.9] لها جزئين من البورسلين موصلان فيما بينهما بالأسمنت. ويتم اختيار شكل التنورات الداخلية للعازل وأبعادها بمساعدة التجارب التي تهدف إلى بلوغ القيمة الضرورية لجهد الشرر المبلل. جهود الشرر الجاف عند 50 cycles

والخصائص النبضية لعوازل العمود المسمارية تكون قريبة جداً من خصائص ثغرة المستوى–العمود عند طولها المساوي لمسافة الشرر الجاف للعازل.

المتانة الميكانيكية mechanical strength لعوازل العمود المسمارية المنفصلة تُحدد بواسطة متانة المسمار وليس بمتانة رأس البورسلين، حيث إنه أثناء تأثير حمل الانحناء على غطاء العازل –فإن عزم الانحناء– المؤثر على رأس العازل وبسبب السمك الصغير للبورسلين يحدث أن يكون أصغر كثيراً من عزم الانحناء المؤثر على المسمار.



الشكل 7.9: عازل عمود–مسماري لـ 35 kV

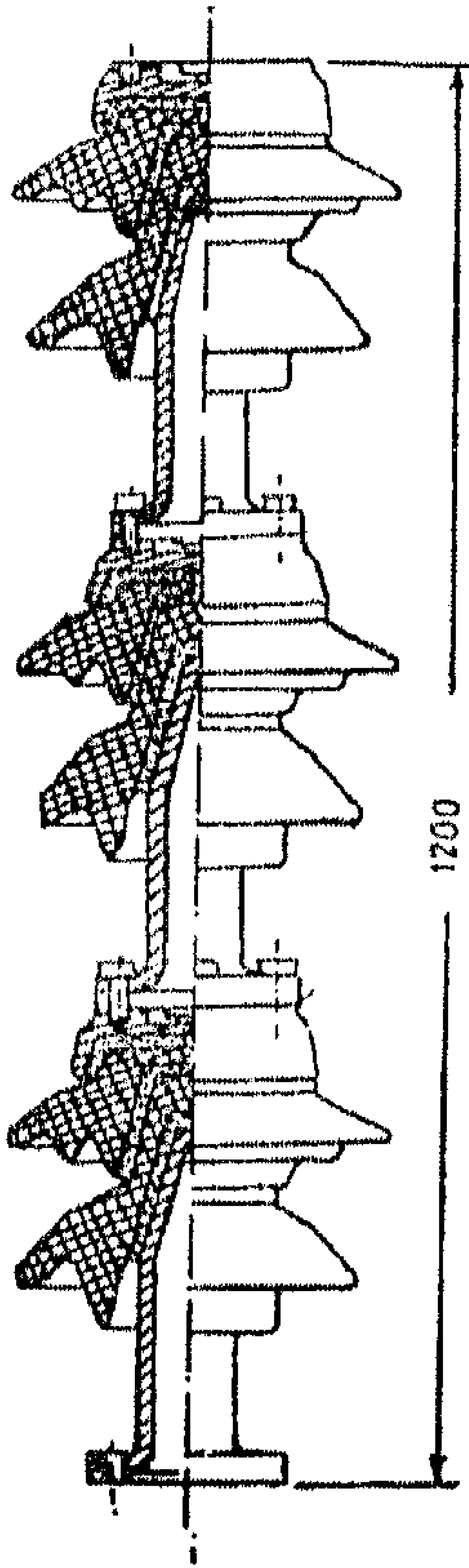


الشكل 7.10: عازل عمود–مسماري لـ 35 kV ذات متانة ميكانيكية متزايدة

ومع ذلك، ففي الأعمدة مع ثلاثة إلى خمسة عوازل [الشكل 7.11] يؤثر غالباً نفس عزم الانحناء -وكذلك على المسمار- على رأس العازل السفلي. في هذه الحالة تكون رأس البورسلين مكاناً ضعيفاً وتحدد متانة العمود الكامل تحت الانحناء بواسطة متانته.

ويمكن زيادة متانة الرأس إذا صُنعت من ثلاثة أجزاء قوية من البورسلين وليس اثنين والعازل الذي نحصل عليه في هذه الحالة موضح في الشكل 7.10 وله متانة ميكانيكية متزايدة ويستخدم مع الخطوط 35 kV . وتستخدم أعمدة منه مكونة من خمسة عوازل في التركيبات ذات الجهد 220 kV .

عند جهد فوق 220 kV وبالنسبة للأعمدة الداعمة المفردة، يكون مطلوب عوازل ذات متانة ميكانيكية عالية جداً، تصنيعها يتضمن صعوبات كبيرة. وفيما يتعلق بذلك، في التركيبات ذات الجهد الأعلى من 220 kV تستخدم منشآت داعمة تتكون من أعمدة قليلة. في الشكل 7.12 موضح عازل لـ 500 kV مجمع من عوازل طراز KC-400 كمثال. العوازل في تلك المنشآت تعمل ليس فقط على الانحناء بل أيضاً على الشد والانضغاط.



الشكل 7.11: عمود من عازل عمود-مسماري لـ 110 kV



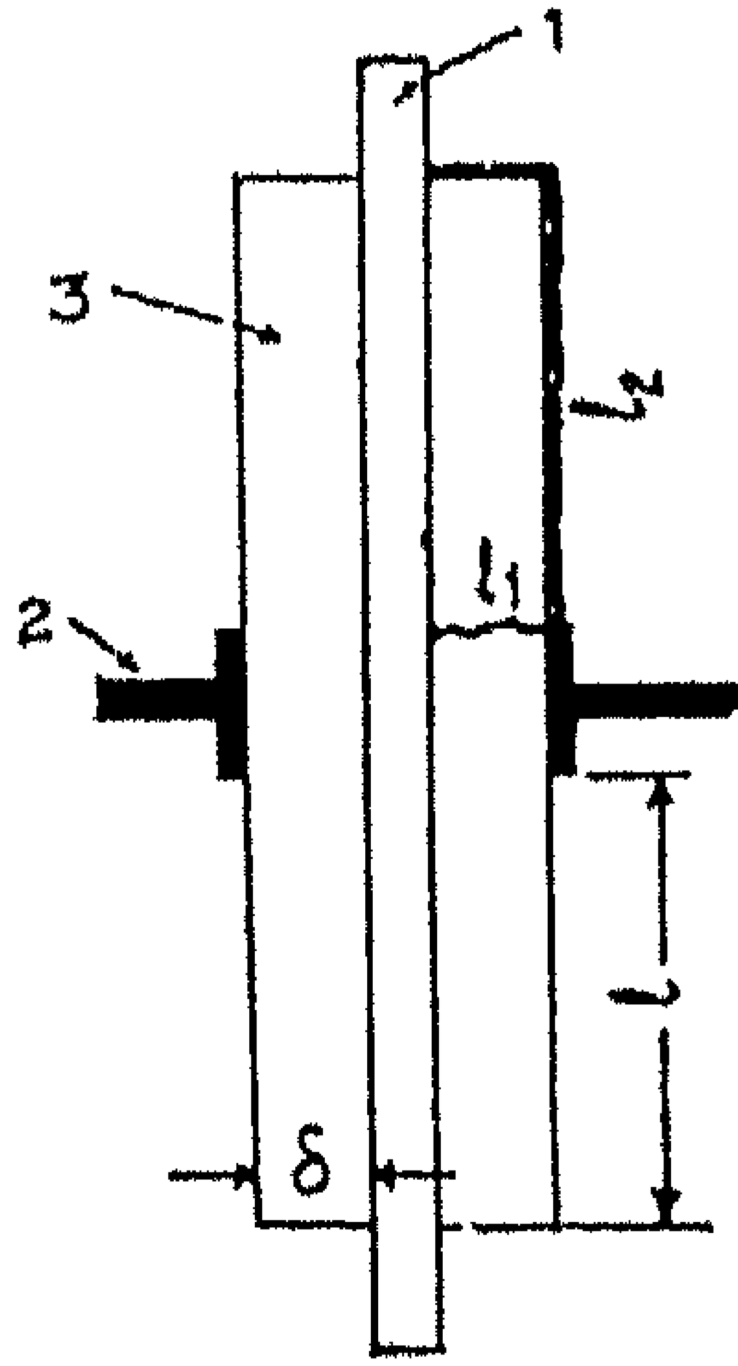
الشكل 7.12: صورة عازل لـ 500 kV يتكون العمود من عوازل KC-400

٧-٢ عوازل المداخل [الجلب] Entrance Insulators [Bushings]

٧-٢-١ معلومات عامة General Information

موضح في الشكل 7.13 تخطيطياً عازل مدخل. وهو يتكون من قضيب حامل للتيار 1، شفة 2 بمساعدتها يثبت العازل بجدران المبنى أو لجسم الجهاز، وجسم عازل 3 والذي يكون عند جهود ليست عالية جداً (10–3) kV – اسطوانة بسيطة من عازل كهربي له المتانات الكهربية والميكانيكية الضرورية [مثلاً بورسلين أو ورق مبكلت]. عند جهود أكبر من 35 kV، يصبح الجسم العازل معقداً إلى حد ما وفيه –كقاعدة– يتم الجمع بين بورسلين، زيت محولات، ورق كرتون، ... إلخ.

عوازل المدخل، مثل عوازل الطرازات الأخرى تنشأ بحيث يكون بالنسبة للظروف العادية للعزل يتعدى التثقب عبر l_1 [الشكل 7.13] جهد الشرر عبر l_2 قليلاً في الشكل المبسط 7.13 يمكن الحصول على القيمة المطلوبة من جهد التثقب حتى عند سمكن صغير نسبياً δ، يكفي من وجهة نظر المتانة الميكانيكية أيضاً. ومع ذلك، عند δ صغيرة نحصل على سعة سطح كبيرة ويكون حدوث تفريغ عبر السطح سهلاً. ولكي نضمن جهد الشرر المطلوب يجب أن يكون الطول l للعازل كبيراً. مثل هذا العازل، وبالرغم من قطره الصغير، سيكون غير مناسب، بسبب الزيادة الكبيرة في الطول، حيث ستزيد بشكل غير مبرر أبعاد الجهاز المستخدم فيه.



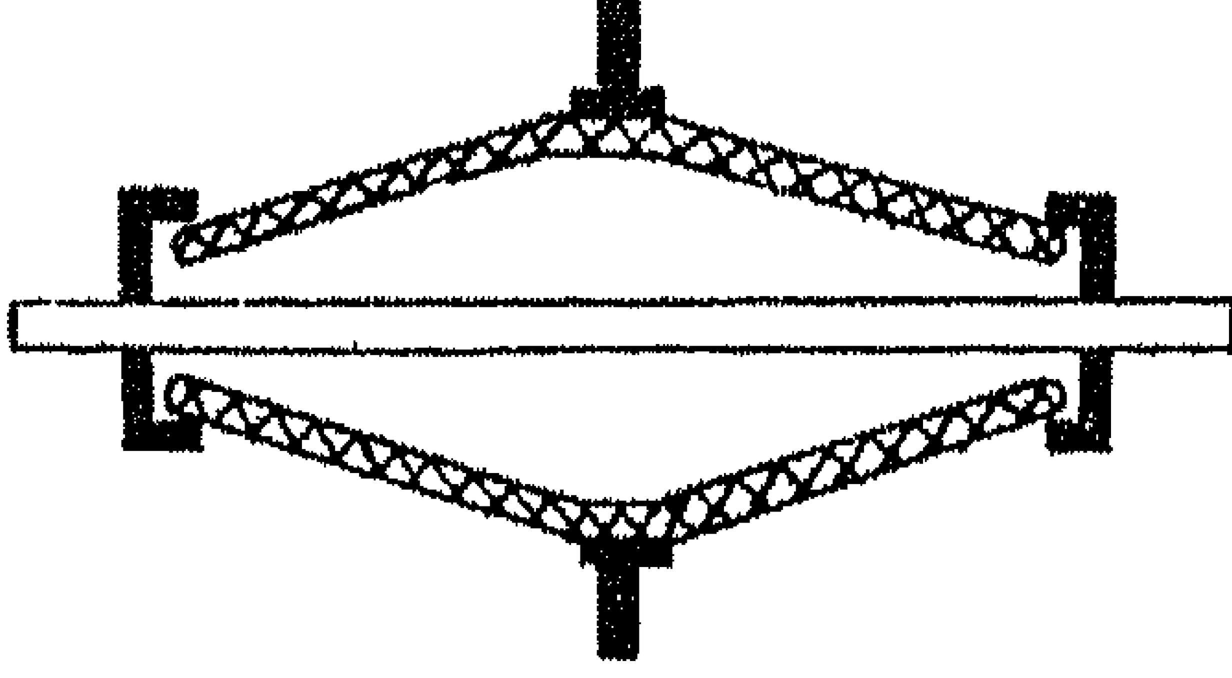
الشكل 7.13: عازل السلك الواصل [الجلب].
(1) قضيب يحمل التيار؛ (2) شفة؛ (3) جسم عازل

تقصير طول العازل بدون أي تغير في جهد تفريغه يمكن أن يتحقق بسهولة بواسطة تخفيض سعة سطحه على حساب زيادة سمك العزل و–بالتالي– قطر الشفة.

ولجهود حتى 35 kV تم الحصول على إنتاج عوازل لها طول مُرضي بزيادة سمك البورسلين مقارنة مع القيمة الضرورية للحصول على جهد التثقب المطلوب، وأيضاً بالتزود

بتعرجات سميكة على السطح [أي على القطاعات حيث سعة السطح تكون ماتزال أصغر وبالتالي، يكون تولد التفريغ مازال أكثر صعوبة].

مبكراً، في العوازل عند هذه الجهود كان الجسم العازل لا يصنع مصمت لزيادة قطر الشفة ولكن مع فجوة [الشكل 7.14] حيث إن إنتاج أدوات سميكة الجدران من البورسلين يكون صعباً.



الشكل **7.14**: عازل مجوف سلك واصل [جلب] مملوء بالهواء

وجود فجوة مملوءة بالهواء في عازل عند جهد kV (10–3) ليس له تأثير عملي على متانة التثقب له لأنه عند جهد قريب من جهد الشرر يحدث تأين للهواء في الفجوة ويؤثر كل الجهد على البورسلين. وبسبب ذلك فعند جهود التفريغ المبدئية تحدث زيادة قليلة في سعة السطح وخفض مقابل في جهد الشرر أيضاً. هذه الظروف دفعت إلى زيادة قطر الشفة قليلاً والتزود بتعرجات على سطح العازل قريباً من شفته.

ولكي نلغي هذا التأثير السيء إما أن يتم تغطية قضيب حمل التيار لعوازل المداخل 35 kV ذات التجويف الداخلي بطبقة من الورقة المبكلت bakelized paper سمكه mm (6–3) أو ملء التجويف الداخلي بمركب. الطريقة الأولى تزيد جهد الكورونا مرتان، وتكون الطريقة الثانية أكثر تأثيراً على الأقل في المبدأ حيث تسمح بمنع الكورونا في الفجوة الداخلية وتزيد من المتانة الكهربية للعازل في الاتجاه النصف قطري. ومع ذلك –عملياً– في فجوة مملوءة بكتلة لزجة سيكون هناك دائماً مصائد غازية أو تجويفات. ولهذا، في المصائد الغازية حتى عند جهد التشغيل، سيحدث تفريغات جزئية تسبب تسخين محلي إضافي، تفكك تدريجي للمركب وزيادة أبعاد الفجوات. وبهذه الطريقة، ومع مرور الزمن، يمكن أن يحدث انخفاض في المتانة الكهربية في الاتجاه النصف قطري تحت تأثير التفريغات الجزئية. ولكي نمنع هذا الخطر يصبح من الضروري تخفيض الشدات المتوسطة العاملة في الاتجاه النصف قطري، أي زيادة قطر الشفة.

في كل الحالات السابقة تم الحصول على المتانة الكهربية الضرورية في الاتجاه النصف قطري باختيار السمك المقابل من البورسلين. بالنسبة لعوازل الجهد 110 kV وما فوقها، تكون هذه الطريقة غير قابلة للتطبيق حيث إن جهد تثقب عازل المدخل 110 kV يجب أن لا يقل عن $kV_{r.m.s}$ (500–450) [تقريباً أكبر بـ 1.5 مرة من جهد الاختبار]. وتصنيع جسم بورسلين

صلب لعازل له تلك المتانة الكهربية العالية يكون مستحيل عملياً، حيث إن شدة التثقب تهبط بحدة جداً مع أي زيادة في السمك. لذلك، تصنع عوازل 110 kV وما فوقها. مع تجويف داخلي كبير مملوء بمادة عازلة لها متانة كهربية عالية. زيت المحولات يعتبر مناسب جداً لهذا الغرض. بسبب لزوجته الصغيرة والذوبانية العالية للغازات فيه، لا تستطيع فجوات الغازية المتخلفة أن تتكون فيه وكذلك فإن انتقال الحرارة يكون جيداً.

ومع ذلك، فإن المتانة الكهربية للزيت في الثغرات الكبيرة تكون غير كافية للحصول على بعد نصف قطري مقبول للعازل. بالنسبة لمجال غير منتظم بحدة يعبر عن جهد الانهيار المتوسط لزيت المحولات بالعلاقة التالية:

للارتفاع الناعم: $V_{BD} = 28.2S^{0.64}\ \text{kV}_{r.m.s}$

لتأثير دقيقة واحدة: $V_{BD} = 26.6S^{0.64}\ \text{KV}_{r.m.s}$

حيث V_{BD}= جهد الانهيار.

S = المسافة بين الإلكترودات (cm) [العلاقة المعطاة تنطبق جيداً لـ $S > 30$ cm].

من هذه العلاقات يمكن أن نجد بسهولة أنه للحصول على جهد تثقيب في حدود $(450\text{–}500)\ \text{kV}_{r.m.s}$، تكون ثغرة زيت حوالي (100–120) cm ضرورية. ولهذا فإن قطر الشفة يجب أن يناظر (2–2.5) m والذي من الواضح أنه غير مقبول.

ولزيادة المتانة الكهربية لثغرة زيت يتم إدخال عدد قليل من الحواجز الاسطوانية المصنعة من الورق المبكلت بين العمود والشفة flange ويلف العمود الحامل للتيار بورق كابلات [عوازل فاصل–زيت] وهذه الإجراءات تزيد من المتانة الكهربية للثغرة بحوالي 2.5 مرة. والزيادة الرئيسية للمتانة بحوالي 2 مرة ترجع إلى تغطية العمود الحامل للتيار بورق كابلات وبسبب الحواجز القريبة من الشفة. وتحدث هذه الزيادة لأن التغطية والحواجز تجعل تكوين القناطر [مثلاً من الألياف الرطبة للملوثات الموصلة تحت تأثير المجال الكهربي والذي يحدث عبره التفريغ في الزيت عادة] مستحيلاً. الحواجز المتبقية تزيد من المتانة الكهربية عند 50 cycles تقريباً بـ 50% زيادة.

وتشكل الحواجز قنوات يحسن التدوير الطبيعي عبرها من انتقال الحرارة الناتجة من مفقودات العزل الكهربي. وعلى ذلك فإن جهد الانهيار الحراري يزداد نسبياً.

مع النبضات impulses لا يكون هناك وقت لتكوين القناطر الموصلة، لذلك فإن التأثير الموجب بسبب إضافة الحواجز يكون غائباً. وعلاوة على ذلك حيث إن الحواجز لها منفذية عزل كهربي أكبر من تلك الخاصة بالزيت، فإن شدة المجال الكهربي تزداد. ولهذا السبب فإن أي حواجز إضافية تخفض المتانة النبضية للعازل قليلاً. وبوضع ذلك في الاعتبار يستخدم عدد صغير من الحواجز في عوازل مداخل حاجز-الزيت.

وأوضحت التجارب أنه مطلوب أن نسترشد بالقيم التالية لأعلى شدات مسموحة في قنوات الزيت. وهذه الشدات تقابل جهود الاختبار للعوازل.

بالنسبة لسمك قناة زيت حوالي mm (100–40)، وقطر سطح داخلي أقل من 200 mm فإن الشدة على السطح الداخلي يجب أن لا تتعدى $kV_{r.m.s}/cm$ (50–45)، في القنوات ذات السمك الأصغر يمكن أن تزداد الشدة حتى $kV_{r.m.s}/cm$ (65–60). وإذا كان قطر السطح الداخلي أكبر من 200 mm فإن الشدة المتوسطة في القناة التي سمكها mm (100–40) يجب أن لا تزيد عن $kV_{r.m.s}/cm$ (45–40).

ويتحقق المزيد من تحسن عزل حاجز-الزيت بتنظيم المجال الكهربي بمساعدة أسطح من الحديد المقصدر [المدهون بالقصدير] tinfoil يوضع على الحاجز.

٧-٢-٢ تركيب عوازل المدخل [الجلب] Construction of Entrance Insulators [Bashings]

عوازل مدخل المحطة والأجهزة تكون متماثلة من حيث المبدأ في النظام. ومع ذلك، هناك فروقات قليلة في عملها تثير فروقات في تركيبهم أيضاً. فمثلاً، تملأ خزانات المحولات وأجهزة أخرى كثيرة بزيت عازل. في هذه الحالات يغمر طرف واحد من عوازل المدخل -وهو الداخل إلى الخزان- في الزيت. متوسط شدة الشرر في الزيت يكون أعلى منها في الهواء. لذلك، فمن الممكن تخفيض طول هذا الجزء من العازل إلى النصف تقريباً.

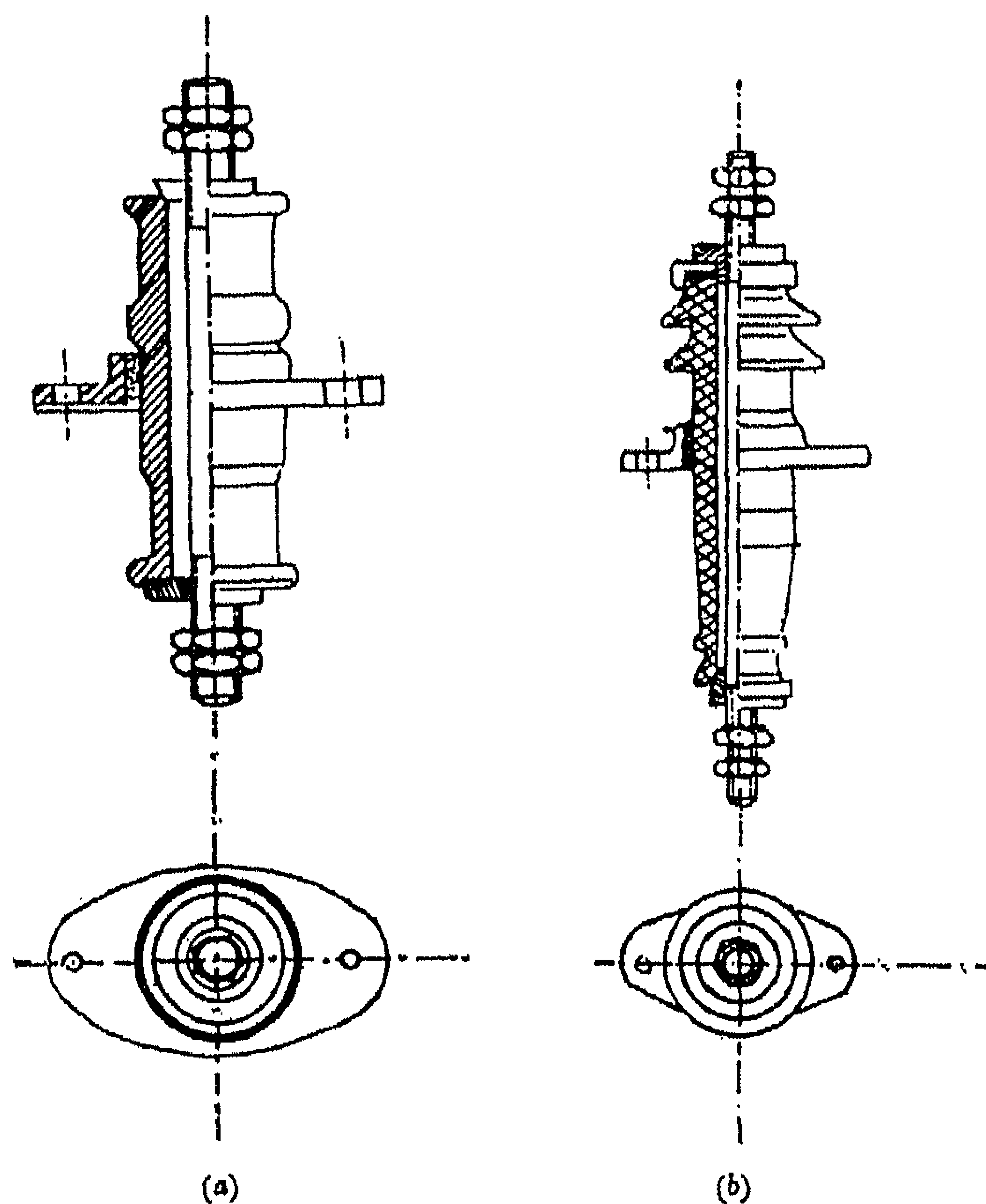
وتعاني جلب المحولات من تسخين إضافي حيث أثناء عمل المحولات يمكن أن ترتفع درجة الحرارة حتى 70°C . مما يؤثر تأثيراً محسوساً على الاستقرار الحراري للعازل، أي على جهد الانهيار الحراري.

تتعرض جلب قواطع الدائرة إلى أحمال دفعية [نبضية] تؤخذ في الاعتبار. لذلك، تتخذ عليهم مطالب أعلى بالنسبة للمتانة الميكانيكية. فبالنسبة لعوازل kV (10–3) تكون هذه المطالب ذات أهمية في اتخاذ القرار أثناء اختيار التركيب، الأبعاد الأساسية والمواد العازلة لهذه العوازل.

التيارات المارة خلال القضيب الحامل للتيار للجلب طراز المحطة يمكن أن يصل إلى قيمة حوالي آلاف قليلة من الأمبير. في هذه الحالات يكون القضيب الحامل للتيار على شكل حزمة

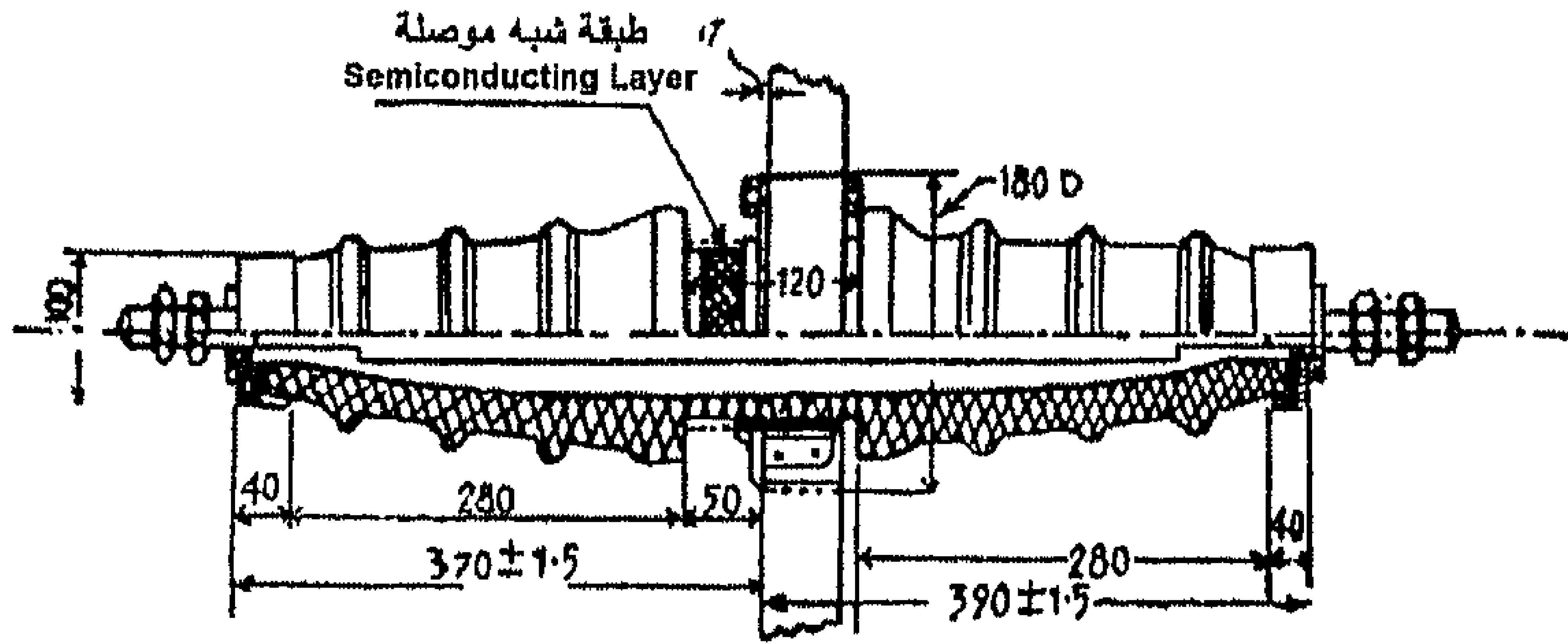
من الموصلات العمومية busbars ذات المقطع الكبير والتي تحدد بنفسها الأبعاد النصف قطرية الرئيسية للعازل. ومع ذلك -بالرغم من هذا والخصوصيات الأخرى- فإن المبادئ الأساسية لتركيب الجلب القوية كهربياً في كل الحالات تبقى متماثلة عامة.

المطالب المحددة على هذه العوازل بالنسبة لمتانتها الكهربية منظمة بواسطة GOST 1516-60 والتي فيها قيم جهود الاختبار لمعدات الجهد العالي تكون موحدة قياسياً.



الشكل 7.15: جلبة بورسلين سلك واصل لـ 6 kV . (a) للتركيبات الداخلية؛ (b) للتركيبات الخارجية

ويوضح الشكل 7.15(a) نظام وأبعاد الجلب طراز المحطة من البورسلين مع فجوة هوائية للخطوط kV (6–10). عوازل التركيبات الخارجية [الشكل 7.15(b)] لها أسطح معرجة كثيرة في ذلك الجزء المتواجد بالخارج. مسند تركيب العوازل الداخلية والخارجية يكون متماثلاً. القيمة الأساسية للمتانة الكهربية في الاتجاه النصف قطري تتحقق في هذه الحالة بأسلوب سهل باختيار السمك المناسب للبورسلين [الشكل 4.2].



الشكل 7.16 : عازل بورسلين سلك واصل لـ 35 kV مع تجويف هوائي والعمود مغطى بطبقة من الورق مع طبقة شبه موصلة على سطح العازل لتخفيض شدة المجال الكهربي وزيادة جهد الشرر

الشكل 7.16 يوضح عازل ذو تركيب مماثل لـ 35 kV مع فجوة هوائية والعمود مغطى بطبقة من الورق. وإلى جانب ما سبق مناقشته تم التزود بطبقة شبه موصلة semiconducting layer تخفض من شدة المجال الكهربي في الحال بالقرب من الشفة وعلى سطح العازل لزيادة جهد الشرر. وبسبب ذلك يبدأ تفريغ انحداري في النمو ليس من حافة الشفة ولكن من حافة الطبقة التي على القطاع حيث تكون سعة السطح أصغر طبقاً للتعرج. وبحس تكنولوجي تكون العوازل التي بدون تجويف هواء الموضحة في الشكل 7.17 أكثر دمجاً وملائمة. وفي هذه العوازل نحصل على التخفيض في قطر الشفة بزيادة سمك البورسلين في الجزء الأوسط للعازل –وبالمثل– بزيادة أبعاد التعرجات [السمك أساساً] الأقرب للشفة. ولمنع الكورونا على القضيب الحامل للتيار [لكي نمنع تعجيل صدأ الأجزاء المعدنية] يتم تعدين السطح الداخلي للعازل أو تغطيته بشبه موصل لمنح جهد من العمود إلى السطح الداخلي.

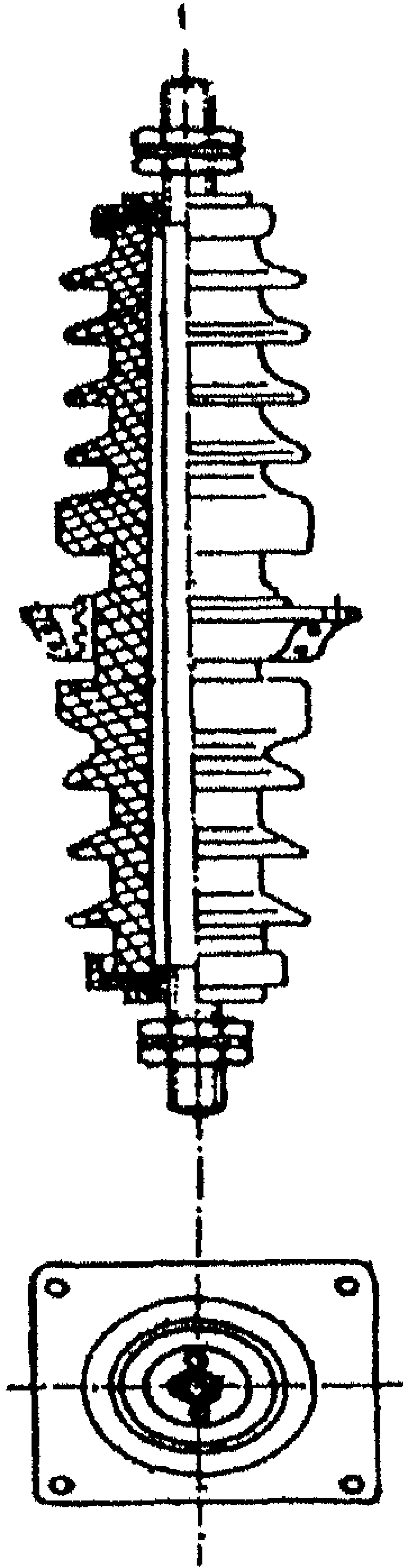
أثناء تقدير جهد شرر جلب البورسلين، مطلوب الاقتداء بالقيم المتوسطة التالية :

- الشرر الجاف عند 50 c/s هو $kV_{r.m.s}$/cm (4–5) .
- الشرر المبلل عند 50 c/s هو $kV_{r.m.s}$/cm (2.5–2.7) .
- الشرر الدفعي 50% هو kV/cm (6–8) .
- وبالنسبة لتفريغ زمني 2 μ sec. kV/cm (7–10) .

ولجهد 35 kV، تصنع جلب طراز المحطة فقط. أما أجهزة ومحولات 35 kV فإنها تكون كبيرة الحجم.

جلب مكثف ورق البكاليت، والتي تكون مدمجة وفي نفس الوقت قوية كهربياً وميكانيكياً تستخدم على نطاق واسع جداً كجلب أجهزة ومحولات عند 35 kV .

وتكون جلب الورق المبكلت هي الأبسط في التركيب. وهي تجهز بلف اسطوانة من الورق المورنش المضغوط براتينج البكاليت على القضيب حامل التيار. ولتنظيم المجال الكهربي في الاتجاهات النصف قطرية والمحورية، توضع ألواح من رقائق القصدير دورياً في الاسطوانة [بعد عدد محدد من اللفات]. أثناء زمن اللف تضغط الاسطوانة بواسطة دلافين اسطوانية roller ساخنة [حوالي 160°C] حتى ينصهر الراتينج ويصمغ طبقات الورق. وبعد ذلك تخضع الاسطوانات لمعالجة حرارية حيث يتحول الراتينج إلى بوليمرات. وبعد ذلك تؤرض أطراف الاسطوانة، وتوضع ضمادة [من الألياف] تحت الشفة ويصمغ السطح لزيادة مقاومة امتصاص الرطوبة.



الشكل 7.17: السلك الواصل في عازل بورسلين بدون تجويف هواء

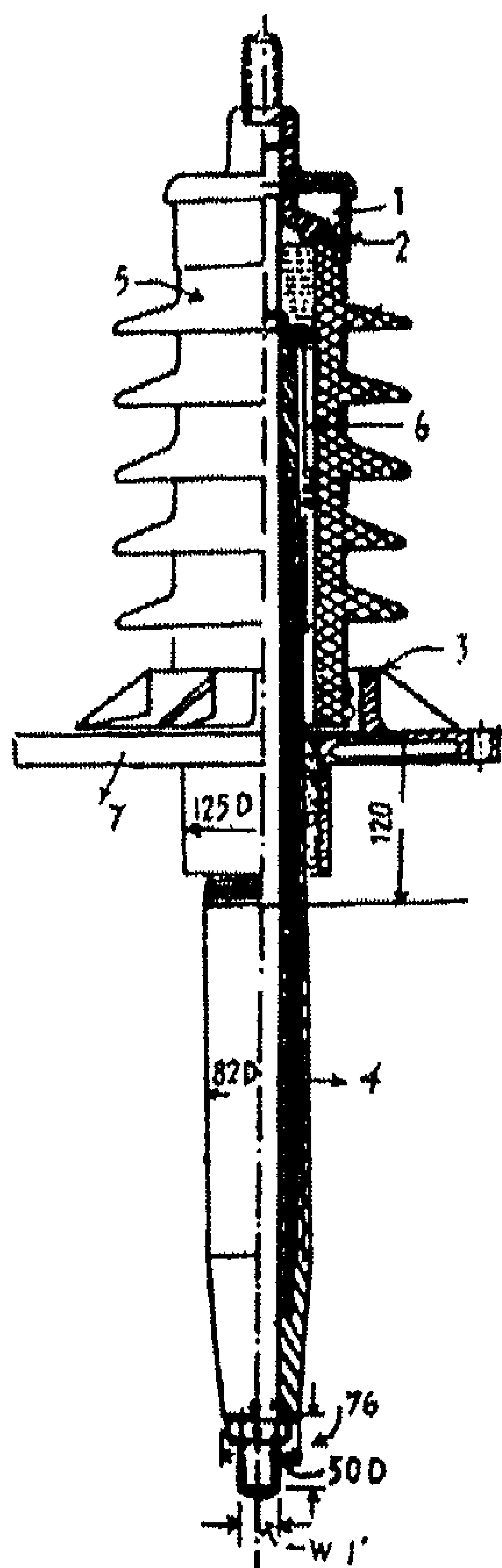
عيب عوازل الزيت–الورق هو مقاومتها الصغيرة لامتصاص الرطوبة بسبب تركيبهم الطبقي. لذلك، فإن العوازل المستخدمة في التركيبات الخارجية توضع في أغطية من البورسلين ويملأ الفراغ بين الغطاء وقلب البكاليت–الورق براتينج عازل. ويوضح الشكل 7.18 مثال لعازل قاطع دائرة MKπ-76. ويزداد أبعاد العازل طبيعياً في هذه الحالة ولكنه يظل مقبولاً. وبدون غطاء البورسلين فإن عوازل البكاليت–الورق تكون مناسبة لتركيبات المناطق الجافة فقط.

وتستخدم عوازل الورق–البكاليت أيضاً عند جهود أخرى kV (220–3)، وخاصة في معدات معامل الجهد العالي التي تعمل في جو جاف. وجميعها تنظم بالمثل بصرف النظر عن قيمة الجهد الاسمي. الأبعاد وعدد الأسطح فقط هي التي تنظم تغير المجال الكهربي [لـ kV (10–3) ثلاثة أسطح، ولـ 220 kV تكون 30 أو أكثر].

لعوازل الورق–البكاليت 35 kV وأعلى تكون متوسط شدة الشرر الجاف عند 50 c/s هي $(4.5–4.8)\ kV_{r.m.s}/cm$.

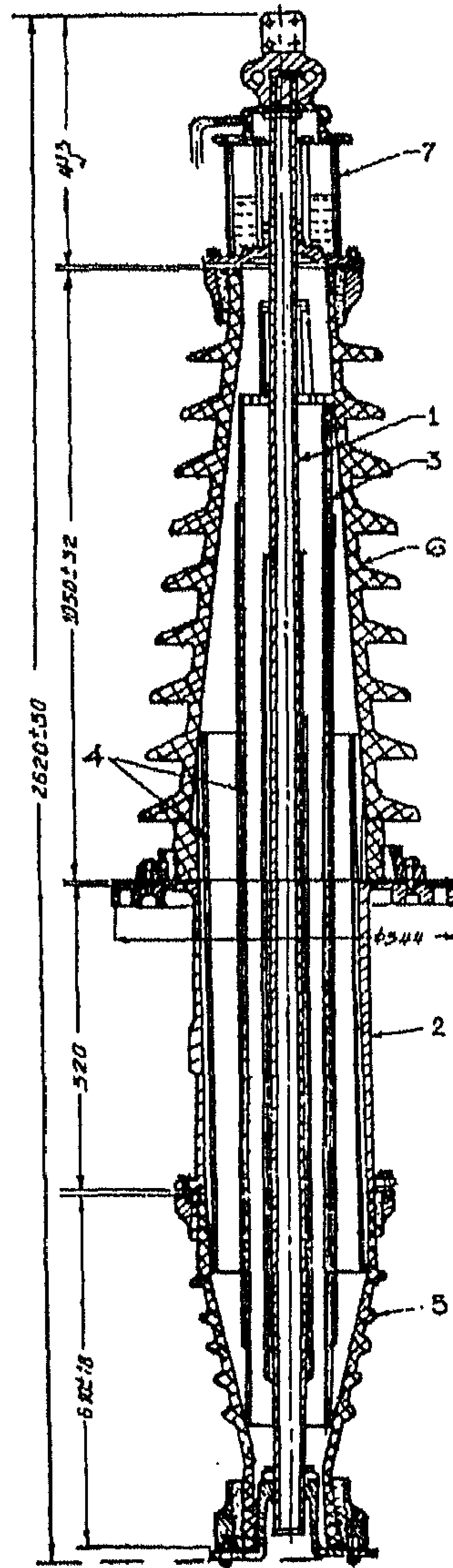
معظم جلب القدرة ومحولات الاختبار وأيضاً قواطع الدائرة عند 110 kV وما فوقه تجهز من العازل الداخلي فاصل-الزيت -oil barrier internal insulation [الشكل 7.19].

وموضح في الشكل 7.19 مثال لجلبة حاجز زيت يستخدم عند 110 kV . العزل الداخلي الرئيسي هنا هو ثغرة زيت مقسمة إلى عدد من الأجزاء بواسطة حواجز ورق مُبكلت جهد شرر جلب حاجز الزيت تحدد أساساً بواسطة البورسلين المغطى بطولهم، بواسطة أعداد وأبعاد التعرجات -وإلى جانب ذلك- فإن الأسطح القريبة من الشفة والموصلة بها تبذل تأثيراً ملحوظاً على قيمة جهد الشرر الجاف [عند 50 c/s والدفعي] وبالإسقاط وراء حافة الشفة، فإنها تحجبهم، أي تخفض الشدة على سطح البورسلين المغطى قريباً منهم. ونحصل على أقصى تأثير في حالة أن يكون طول حجاب السطح %(10–8) من طول التغطية. وبذلك تزداد جهود الشرر المبلل بحوالي %(12-10). الأسطح الأخرى الموجودة على الحواجز، والتي هي نفسها موجودة على بعد أكبر من الشفة، تبذل تأثيراً أقل على قيمة جهد الشرر الجاف.



الشكل 7.18: عازل السلك الداخل للتركيبات الخارجية عند جهد 35 kV لقاطع الدائرة MKπ-76. (1) غطاء أمطار؛ (2) مخمد حديد زهر؛ (3) مركب أسمنتي؛ (4) ورق بكاليت؛ (5) غطاء أسمنتي؛ (6) راتينج؛ (7) شفة

متوسط جهود الشرر في الزيت تكون أكبر بحوالي مرتين عن تلك الموجودة في الهواء. لذلك، فإن الجزء السفلي من عازل حاجز الزيت والذي يغطس داخل خزان المحول أو قاطع الدائرة، يكون له طول أصغر وتعرجات أصغر على الغطاء.



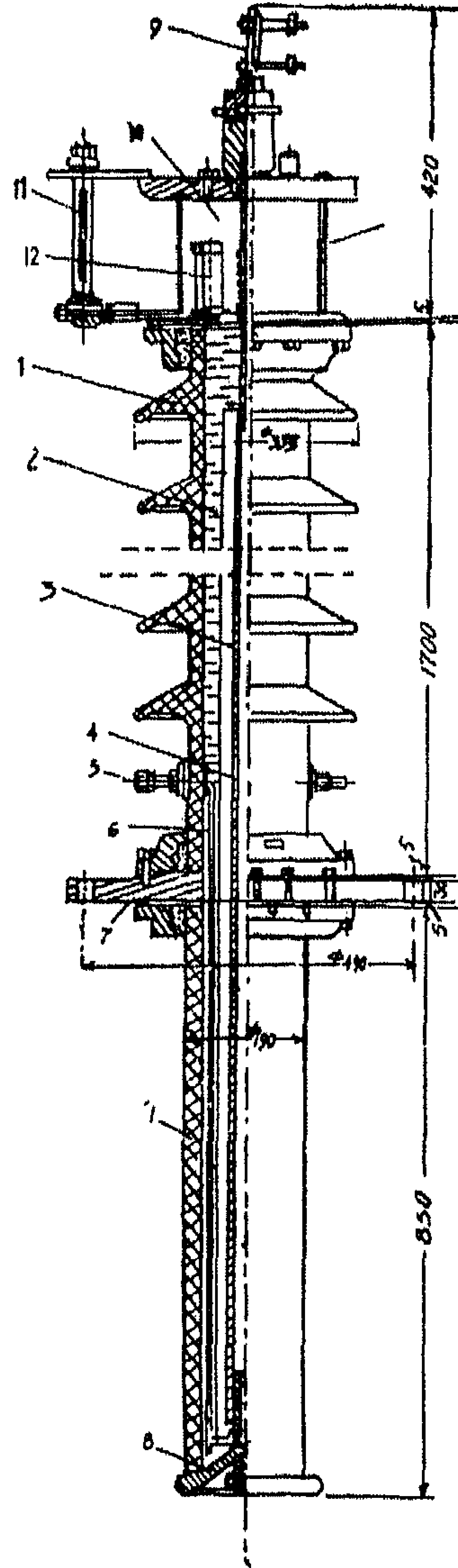
الشكل 7.19: جلبة حاجز [فاصل]-الزيت لـ 110 kV

بالنسبة لعوازل حاجز الزيت عند kV (110–400) فإن شدة الشرر المتوسطة يكون لها القيم التالية:

- شدة الشرر الجاف عند 50 c/s هي $kV_{r.m.s}$ /cm (3.3–4.3).
- شدة الشرر المبلل عند 50 c/s هي $kV_{r.m.s}$ /cm (2.3–2.6).
- شدة الشرر النبضي هي kV/cm (5.6–7) حد أدنى.

- شدة الشرر للتفريغ زمن .2.5 μ sec هي kV/cm (9.4–11) .

القيم الأكبر من الشدة تكون عند 110 kV ، والأصغر للعوازل عند 400 kV .



الشكل 7.20: الجلب العازلة زيت–ورق لـ 150 kV . (1) غطاء بورسلين؛ (2) زيت محولات؛ (3) قلب ورق مشرب؛ (4) قضيب حامل للتيار؛ (5) معدة تفريغ الزيت؛ (6) أنبوبة عازل؛ (7) شفة؛ (8) صدادة؛ (9) طرف؛ (10) غرفة تمدد الزيت؛ (11) مبين الزيت؛ (12) ممتص الرطوبة

عوازل حاجز الزيت تستخدم على نطاق واسع عند 110 kV وما فوقه بسبب البساطة النسبية للتركيب ولأنها لا تتطلب عمليات تكنولوجية معقدة أثناء التصنيع. عيبها الخاص بالأبعاد النصف قطرية الكبيرة نسبياً يظهر بشدة أثناء التغيير إلى جهود عالية في حدود -400) kV (500. وبسبب ذلك هناك ميل للتغيير إلى تركيبات أقوى وهي بالاسم جلب مكثف الزيت–الورق [الشكل 7.20].

تركيب الجلب العازلة زيت–ورق موضح في الشكل 7.20. قلب الورق المُشرب بزيت محولات يخدم كالعزل الرئيسي فيه. وهو موجود داخل غطاء البورسلين الذي يشكل خزان للزيت. قلب الورق -كما في حالة عازل البكاليت- يتكون بلف عدد من اللفات على القضيب الحامل للتيار. وفي عملية اللف، فإن اللفات تتم بأبعاد محددة -كما في حالة اسطوانة الورق المبكلت- توضع عليه لتنظيم المجال الكهربي.



عزل معدات التوزيع والعازلات الخاصة للمناطق الملوثة

Insulation of Distribution Equipment's & Special Insulators for Contaminated Regions

٨-١ جهود الاختبار لمعدة كهربية Test Voltages for Electrical Equipment

عزل المعدات الكهربية يمكن أن يقسم إلى جزأين: العزل الداخلي internal insulation: حيث يكون الوسط العازل سائل أو صلب والمتانة الكهربية له تحدد بواسطة تثقب الثغرات في هذا الوسط أو بواسطة الشرر في العازل السائل عبر أسطحه العازلة. وكمثال، عزل لفات المحول عن الخزان والقلب، العزل بين لفات الجهود المختلفة، عزل الملفات ولفات اللفائف، عزل الجزء الحامل للتيار لقاطع دائرة في الزيت عن جدران خزانه، وهكذا، تنتسب إلى العزل الداخلي. السمة المميزة الرئيسية للعزل الداخلي هي عملياً التحرر الكامل لمتانته الكهربية من الظروف الجوية الخارجية.

الجزء الثاني من عزل المعدات الكهربية هو العزل الخارجي external insulation: حيث يكون الوسط العازل هو الهواء الجوي والمتانة الكهربية له تحدد بواسطة انهيار الثغرة الهوائية أو الشرر في الهواء عبر الأسطح العازلة. وكمثال، أسطح الجلب الموضوعة في الهواء، ثغرات الهواء بين الأطوار المختلفة للمحولات أو قواطع الدائرة تنتمي إلى العزل الخارجي. اعتماد متانته الكهربية على الظروف الجوية [الضغط الجوي ودرجة الحرارة ورطوبة الهواء] هي السمة المميزة للعزل الخارجي.

وبسبب السمات المختلفة للعزل والتأثير المختلف للظروف الجوية على اختيار متانته الكهربية، تم معايرة الجهود منفصلة للعزل الداخلي والخارجي.

في الجدول 8.1 معطى جهود الاختبار الدفعية [النبضية] للمعدات الكهربية مع عزل عادي طبقاً لـ GOST 1516-60. وينفذ الاختبار طبقاً لما يسمى "طريق الدفع الثلاثية" three impact

method. في البداية تؤثر موجة كاملة مع السعة [الذروة] الموضحة في الجدول ثلاث مرات على الهدف تحت الاختبار وبعد ذلك تؤثر أيضاً موجة مشطورة chopped wave ثلاث مرات. وينفذ اختبار العزل الداخلي لكل من قطبيتي الجهد. ويوصى بإجراء اختبار العزل الخارجي لقطبية سالبة فقط. وإذا لم يحدث تثقب أو تدمير للعزل عند زمن الاختبار، فإن العزل يكون قد اجتاز الاختبار وصمد له.

وحيث إن العزل يجب أن يصمد ويقاوم تأثير الجهود الزائدة الجوية المحددة بواسطة مانعات الصمام الذاتية [الأوتوماتية]، الجهد المتخلف للمانعة arrestor للجهد الاسمي المقابل يؤخذ كأساس لتحديد المكان المطلوب على العزل. المتانة الدفعية المضمونة للعزل -أي سعة الدفع التي يمكن أن يقاومها العزل تكرارياً أثناء التشغيل- تثبت فوق الجهد المتخلف لمانعة الصمام الذاتية.

$$(1.1V_5 + 15)\ \text{kV}$$

حيث V_5= الجهد المتخلف للمانعة عند تيار دفعي $5\ \text{kA}_{max}$ [لمانعات حتى 330 kV].

أثناء تحديد جهد الاختبار الدفعي لعزل داخلي يؤخذ في الاعتبار إمكانية تراكم التأثيرات المخفية في العزل أثناء تأثير موجة كاملة عليه، أي ما يسمى "تأثير تراكمي". ولذلك، يزداد الجهد المضمون بـ 10% . وبهذه الطريقة فإن جهد الاختبار الدفعي لعزل داخلي لجهاز يساوي:

$$1.1(1.1V_5 + 15)\ \text{kV}$$

أثناء اختبار محولات بدون إثارة يزداد جهد الاختبار الدفعي بـ $0.5V_{nom}$. ويؤخذ جهد الاختبار لموجة مشطورة ليكون أكبر بـ 20% من ذلك الخاص بالموجة الكاملة. وهذه القيمة تكون كافية للتنسيق الصحيح لعزل محولات وأجهزة مع خصائص فولت-ثانية لمانعات الصمام الذاتية لمرات تأثير صغيرة للجهد.

أثناء تحديد جهد الاختبار الدفعي لعزل خارجي نعتبر أن المعدة ذات الجهد الاسمي [الاعتباري] حتى 330 kV يمكن أن تعمل حتى ارتفاع يصل إلى 1000 m فوق مستوى سطح البحر وعند درجة حرارة محيطة حتى 35°C . كل 3°C زيادة في درجة الحرارة فوق العادية [20°C] تعطي تخفيض في المتانة 1% . فعند 35°C تصبح المتانة أقل بـ 5% . زيادة الارتفاع وبسبب هبوط الضغط البارومتري يسبب أيضاً تخفيض في متانة العزل الخارجي. فكل 100 m

تعطي خفض في المتانة حوالي 1% . مع اعتبار التغيرات المكنة للظروف الجوية في الحدود المشار إليها سالفاً، فإن جهد الاختبار النبضي للعزل الخارجي يُحدد من خلال المتانة المضمونة بالطريقة التالية:

$$\frac{1.1V_5+15}{0.84}\ \mathrm{kV}$$

جهد اختبار العزل الخارجي لموجة مشطورة يؤخذ ليكون أكبر بـ 25% من ذلك الخاص بالموجة الكاملة.

جهد الاختبار للعزل الخارجي الموضح في الجدول 8.1 والجداول التالية 8.2، 8.3 يكون مخفضاً للشروط الجوية العادية [ضغط جوي 760 mmHg، ودرجة حرارة 20°C، ورطوبة مطلقة $11\ gr/M^3$]. وفي حالة انحراف الشروط الجوية للاختبار عن الشروط العادية فمن الضروري إجراء تصحيح في قيمة جهد الاختبار.

في الجدول 8.2 معطى جهود الاختبار لتردد القدرة طبقاً لـ GOST للمعدات الكهربية مع عزل عادي.

اختبار العزل الخارجي عند تردد القدرة 50 c/s بواسطة رفع الجهد تدريجياً حتى القيمة المعطاة في الجدول [محولة إلى الظروف الجوية أثناء زمن الاختبار] ينفذ بدون حفظ الجهد ثابت عند أي قيمة لأي طول محسوس من الزمن.

ينفذ الاختبار تحت الأمطار عند شدة مطر صناعي 3 mm/min ، مع مياه أمطار لها مقاومة نوعية (9500–10500) Ω.cm وتعمل نافورات المياه زاوية 45° مع الأفقي.

أثناء تحديد قيمة جهود الاختبار في هذه الحالة، فإن قيمة الجهود الزائدة الداخلية في المعدة ذات جهد اسمي تؤخذ كأساس حيث إن العزل يجب أن يقاوم هذه الجهود الزائدة. أثناء التحول من المستوى المحسوب [النظري] للجهود الزائدة إلى جهد الاختبار تحت الأمطار، يتم تصحيح انحراف شروط الاختبار عن شروط التشغيل.

أثناء تحديد جهود الاختبار في ظروف جافة تؤخذ في الاعتبار إمكانية خفض المتانة بسبب الظروف الجوية. وكنتيجة فإن جهود الاختبار في الظروف الجافة تكون أكبر من تلك التي تحت الأمطار بـ (20–30)%. جهد الاختبار في ظروف جافة هو الخاصية الرئيسية للمعدة المطلوبة للتركيبات الداخلية المغلقة.

الجدول 8.1: جهود الاختبار الدفعية للمعدات الكهربية مع عزل عادي GOCT 1516-60

Nominal voltage ($kV_{r.m.s}$)	The max, working voltage ($kV_{r.m.s}$)	Test voltage for the internal insulation ($kV_{r.m.s}$)			Test voltage for external insulation ($kV_{r.m.s}$)				
		Tested without excitation: transformers, power and voltage and shunt reactors	Apparatus, current transformers and power and voltage transformers excitation and shunt reactors	Transformers and apparatus	Fully assembled apparatus and transformers		Insulators separately tested		Gaps between contacts of one and the same pole of separators, ckt. breakers load switches in open position and between the contacts of fuses with the plug removed
			Full wave	Chopped wave	Full wave	Chopped wave	Full wave	Chopped wave	Full wave
3	3.6	43.5	42	50	42	50	44	52	50
6	6.9	60	57	70	57	70	60	73	65
10	11.5	80	75	90	75	90	80	100	90
15	17.5	108	100	120	100	120	105	125	115
20	23	130	120	150	120	150	125	158	140
35	40.5	200	180	225	185	230	195	240	220
110	126	480	425	550	460	570	480	600	570
150	172	690	585	760	630	785	660	825	790
220	252	945	835	1090	900	1130	950	1190	1100
				1000	1150	1350			
330*	363	1200/1050**	1100	1300**	1000**	1250**	1200	1400	1450
500*	525	1675**	1500	1800	1500	1800	1500	1800	1900

* Project GOCT for electrical equipment protected by the valve arrestors with magnetic arc-extinction.
** For power transformers and shunt reactors.

الجدول 8.2: جهود الاختبار لتردد القدرة 50 c/s طبقاً لـ GOST 1516-60 للمعدات الكهربية مع عزل عادي

Nominal voltage ($kV_{r.m.s}$)	The max, working voltage ($kV_{r.m.s}$)	Test voltage of insulation [one minute valve] ($kV_{r.m.s}$)					Test [with stand value] voltage with smooth rise for external insolution ($kV_{r.m.s}$)			
		Power transformers	Voltage transformers	Apparatus and trans. of current	Bars hand operated and measuring	Insulators tested separately	In dry condition Gaps between one and the same pole of separators and ckt. breakers, of load switches in open condition and between contacts of fuses with the plug removed	Apparatus and transformers	Insulators tested separately	under rain: Apparatus transformers and insulators for external insallation
3.3	3.5	18	24	24	35	25	28	26	27	20
6	6.9	25	32	32	48	32	40	34	36	26
10	11.5	35	42	42	63	42	53	45	47	34
15	17.5	45	55	55	82	57	70	60	63	45
20	23	55	65	65	100	68	85	70	75	55
35	40.5	85	95	95	150	100	130	105	110	85
110	126	200	200	250	–	265	355	280	295	215
150	172	275	275	320	–	340	460	355	375	290
220	252	400	400	470	–	490	675	520	550	425
		460						670		
330	363	575**	460	600	–	630	890	875**	700	550
		630						850		
500*	525	830**	630	770	–	770	1150	1180**	850	700

* Project GOCT for electrical equipment protected by the valve arrestors with magnetic arc-extinction.
** Between phases.

أثناء تحديد جهد الاختبار للثغرات بين التلامسات لواحد ونفس قطب جهاز في شروط مفتوحة –بعيداً عن أي شيء– فإن إمكانية حدوث جهد زائد على واحد من التلامسات مع جهد تشغيل ذات قطبية معاكسة لذروة amplitude تساوي $0.9V_{pH}$ على التلامسات الأخرى يؤخذ في الاعتبار.

الجدول 8.3: جهود الاختبار لتردد القدرة 50 c/s لمعدة كهربية مع عزل منخفض GOST 1516-60

Nominal voltage $(kV_{r.m.s})$	Test voltage of the insullation one min. value $(kV_{r.m.s})$			Test [withstand] value with smooth rise for external insulation $(kV_{r.m.s})$		
	Power trans-formers	Apparatus & measuring trans-formers	Insulators tested separately	In dry condition		Under rain
				Gaps between the contacts of one & the same pole of separators load switches in the open condition and between the contacts of fuses with the plug removed	Gaps & insulators of fully assembled trans-formers & apparatus	Apparatus trans-formers & insulators for external installa-tions
3	10	13	14	18	15	10
6	16	21	21	27	23	18
10	24	32	32	42	35	28
15	37	48	48	62	53	42

يفترض أن يقاوم العزل الداخلي الاختبار، إذا لم يُدمر مع تأثير جهد الاختبار عليه لمدة دقيقة واحدة. وأوضحت الأبحاث أن عزل حاجز الزيت الداخلي للمحولات له متانة أعلى بـ %(40–30) [في مجال كهربي منتظم نسبياً مع فعل قصير الزمن للجهود الزائدة الداخلية] عن ذلك الذي تحت تأثير جهود تردد القدرة. وهذا يسمح بتخفيض قيمة جهود اختبار تردد

القدرة للعزل الداخلي مقارنة مع مستوى الجهد الزائد الداخلي. إلى جانب ذلك، كما هو مع الاختبار الدفعي مع موجة كاملة، فإن إمكانية التأثير التراكمي قد أخذ في الحسبان.

إذا قارنا الطلب على عزل بواسطة اختبار دفعي واختبار تردد قدرة، نرى أن الأبعاد الفعلية لعزل المعدة الكهربية مع جهد اسمي حتى 220 kV يتحدد أساساً بواسطة المتانة الدفعية المطلوبة، أي بواسطة الجهود الزائدة الجوية. ومع زيادة الجهد الاسمي، فإن دور الجهود الزائدة الداخلية والتي بالرغم من خفض قيمة نسبة الضرب المحسوبة K [الجدول 8.3] فإن الزيادة في القيمة المطلقة تصبح أكثر أهمية. أبعاد الجهاز الكهربي ذات الجهد الاسمي kV (500–330) تحدد أساساً بواسطة الجهود–الزائدة الداخلية.

ويجب ملاحظة أن كل التركيبات الكهربية ليست مرتبطة مع الخطوط العلوية وتتعرض لتأثير الجهود الزائدة الجوية. بعض التركيبات الكهربية [عادة مع جهد اسمي ليس أكبر من 15 kV]، مثلاً محطات فرعية تعمل على شبكة كابلات تكون محمية تماماً من تأثير الجهود الزائدة الجوية. من الطبيعي، فإن الطلبات المفروضة على عزل المعدة الكهربية في هذه الحالات تحدد بالكامل بواسطة الجهود الزائدة الداخلية. في هذه الحالة يمكن أن تحظى المعدة الكهربية بعزل منخفض ويناسبها جهود اختبار تردد القدرة فقط [الجدول 8.3].

٨-٢ مسافات العزل في الهواء في معدة توزيع

Insulating Distances in Air in Distribution Equipment

أثناء تحديد المسافات العازلة في الهواء بين الأجزاء الحاملة للتيار، وبالمثل من الأجزاء الحاملة للتيار والعناصر المؤرضة لمعدة التوزيع distribution equipment (DE)، من الضروري أن تسترشد بجهود الاختبار الموضوعة للمعدات الكهربية المعطاة في الجداول 8.1، 8.2، وهنا بالنسبة لمعدة التوزيع DE حتى 220 kV، من الضروري أخذ جهود الاختبار الدفعية كأساس، وبالنسبة لـ DE ذات 330 kV، 500 kV جهود الاختبار لتردد القدرة. تحديد الطول الضروري لثغرات الهواء ينفذ حسب المنحنيات التجريبية لجهود الانهيار للثغرات بين الإلكترودات القياسية، أي ثغرات العمود–العمود أو المستوى–العمود. مع مسافات كبيرة بين الإلكترودات في مجال غير منتظم، يعتمد جهد الانهيار قليلاً على شكل الإلكترود ومن الممكن تقدير المتانة الكهربية لأي ثغرة هوائية بدقة كافية بمعرفة جهود الانهيار لثغرات هواء قياسية. وحيث إن نظام الموصلات العمومية لـ DE يكون طويلاً، ويزداد احتمال انهيار ثغرات الهواء عند تلك الأطوال من الموصلات العمومية، فإنه يلزم معامل آمان محدد. المسافات العازلة بين الأطوار

تؤخذ أكبر بـ 10% عن تلك التي بين الطور والأرضي. وإذا كان نظام الموصلات العمومية مرناً فإن المسافات العازلة يجب أن تزداد لتأخذ في الاعتبار إمكانية تقارب الموصلات في باعات متقاربة مع بعضها تحت تأثير الرياح أو تغير درجة الحرارة.

ولضمان سلامة أطقم التركيب والصيانة للخطوط، فإن المسافة بين أي طور والأرض عند هذه الأماكن الأساسية يجب أن تزداد. أدنى مسافات من الأجزاء الحاملة للتيار غير المسيجة بسياج واق حتى الأرض تزداد بحوالي 270 cm، هنا تكون المسافة من أسفل حافة لبورسلين العازل حتى الأرض يجب ألا تقل عن 250 cm . أدنى مسافات بين الأجزاء الحاملة للتيار والسياج الواقي، المباني والمنشآت تزداد بـ 200 cm . أدنى مسافات من الأجزاء الحاملة للتيار حتى المعدات القابلة للنقل تزداد بـ 75 cm .

أدنى مسافات عازلة في الهواء من DE المفتوحة ذات 3500 kV المصدق عليها بواسطة Soyuz Glavenergo معطاة في الجدول 8.4.

٨-٣ العوازل الخاصة بالمناطق ملوثة الجو

Special Insulators for Regions Having Contaminated Atmosphere

التفريغ عبر سطح متسخ [ملوث] ورطب ينمو على هيئة قوس جزئي ينشأ على سطح العازل ويتزايد مع تزايد الجهد المؤثر. وتحدث التفريغات الجزئية عند الأماكن ذات كثافة تيار التسرب الأكبر أو عند الأماكن ذات الرقة المفاجئة في غشاء التلوث. قطاع طبقة التلوث المجفف في هذه الأماكن بواسطة تيار التسرب يصل إلى مقاومة عالية جداً ويغطى بقوس جزئي. حدوث الأقواس الجزئية على عدد كبير من قطاعات سطح العازل تؤدي في النهاية إلى حدوث قفزات الشرر له.

يصبح التفريغ عبر سطح العازل صعباً، إذا كانت طبقة التلوث لها مقاومة عالية جداً تحد من تيار التسرب. ومن الواضح أن العوازل المخصصة للعمل في المناطق القذرة يجب أن تُبنى بحيث تكون طبقة القذارة المترسبة على أسطحها تمتلك أعلى مقاومة ممكنة.

وتعتمد مقاومة طبقة الأوساخ من جهة على التركيب الكيميائي للرواسب، سمك الطبقة وعلى درجة رطوبتها، ومن جهة أخرى، على تشكل وأبعاد السطح المتسخ للعازل، أي على شكل التعرجات، قطر العازل وعلى طول مسار التسرب، أي المسافة الأصغر بين الإلكترودات عبر أسطح العازل.

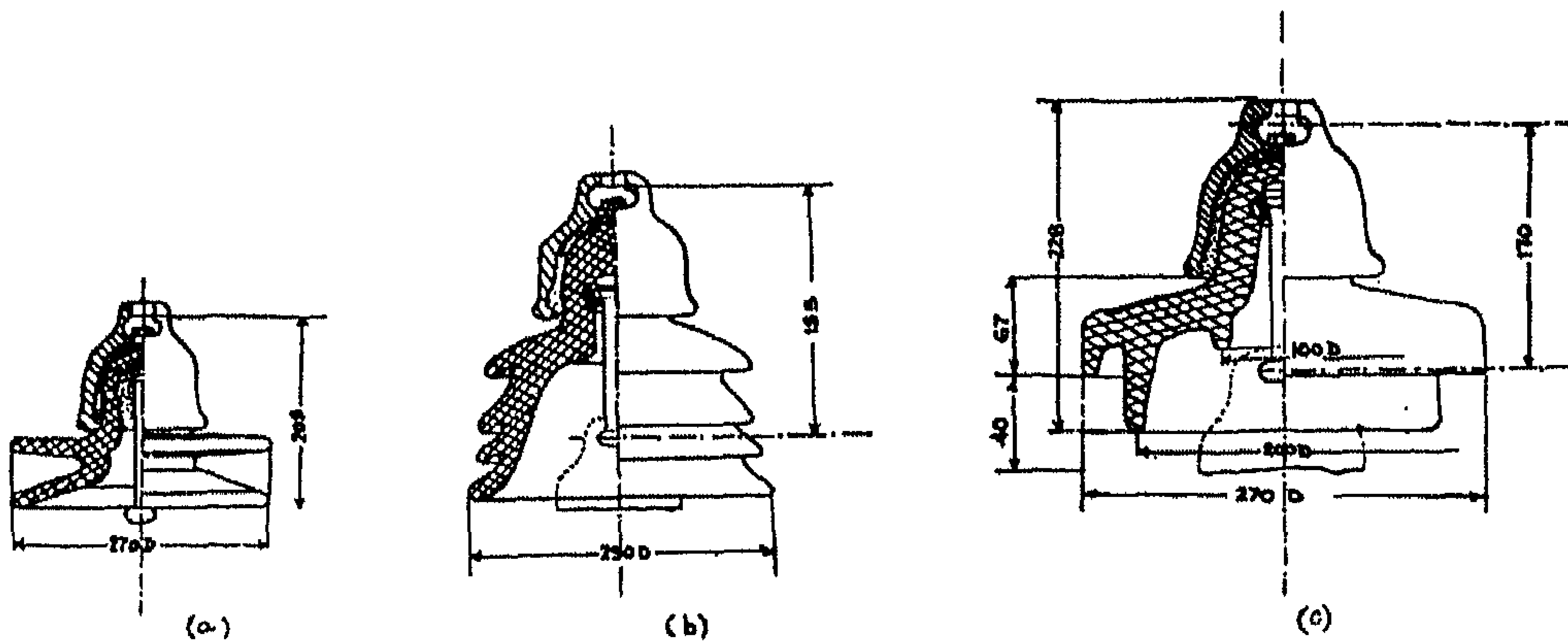
الجدول 8.4: أدنى مسافات عازلة في الهواء (mm) من الأجزاء الحاملة للتيار حتى العناصر المختلفة من معدات التوزيع للمحطات الفرعية (3-500) kV

V_{nom} (kV)	Between current carrying and grounded parts with rigid busbar system	Between current carrying parts of different phases with rigid busbar system	From the point of view of safety of personnel		
			From unfenced current carrying parts upto ground	From current carrying parts upto fencing, buildings and constructions, and between current carrying parts of different circuits also (horizontal distance), if operation of one circuit when the other is disconnected, is forseen	From current carrying parts upto the equipment being transported and from the open contacts of an isolator upto the earthed and current carrying parts
3–10	200	220	2 900	2 200	950
20	300	330	3 300	2 300	1 050
35	400	440	3 100	2 400	1 150
110	900	1 000	3 600	2 900	1 650
150	1 300	1 400	4 000	3 300	2 050
220	1 800	2 000	4 500	3 800	2 550
330	2 500	2 800	5 200	4 500	3 250
500	3 750	4 200	6 450	5 750	4 500

مع التماثل النسبي لأشكال عوازل الجهد العالي، فإن العامل الرئيسي الذي يحدد قدرة تركيب العزل على العمل في شروط الاتساخ هو مسار تيار التسرب.

العزل العادي المستخدم في المناطق البعيدة عن مصادر الأوساخ [المصانع الكيميائية والميتالورجية، البحار، ...إلخ] لها نسبة طول مسار التسرب إلى أعلى جهد خط مشغل لا يقل عن 1.5 cm/kV . بالنسبة للتركيبات المعرضة للتلوث فإن مثل هذا العزل يكون غير مناسب. أما في حالات الاتساخ المتزايد، فيستخدم عزل له نسبة طول مسار التسرب إلى أعلى جهد خط مشغل لا يقل عن 2.25 cm/kV . وفي معظم الحالات فإن استخدام عزل متزايد يعطي نتائج إيجابية في التشغيل. نادراً، خاصة الحالات الخطرة من التلوث بواسطة الرواسب التي تعطي توصيلية سطح عالية فإن التنظيف المتكرر أو غسيل العوازل يجب أن يتم، ويجب أن تقام المحطات الفرعية داخل مباني.

ويمكن الحصول على نسبة عالية لطول مسار التسرب إلى أعلى جهد تشغيل باستخدام عوازل خاصة لها طول مسار تيار تسرب متزايد أو -إذا شملنا السلاسل أو أعمدة العوازل- بزيادة عدد العناصر فيهم.

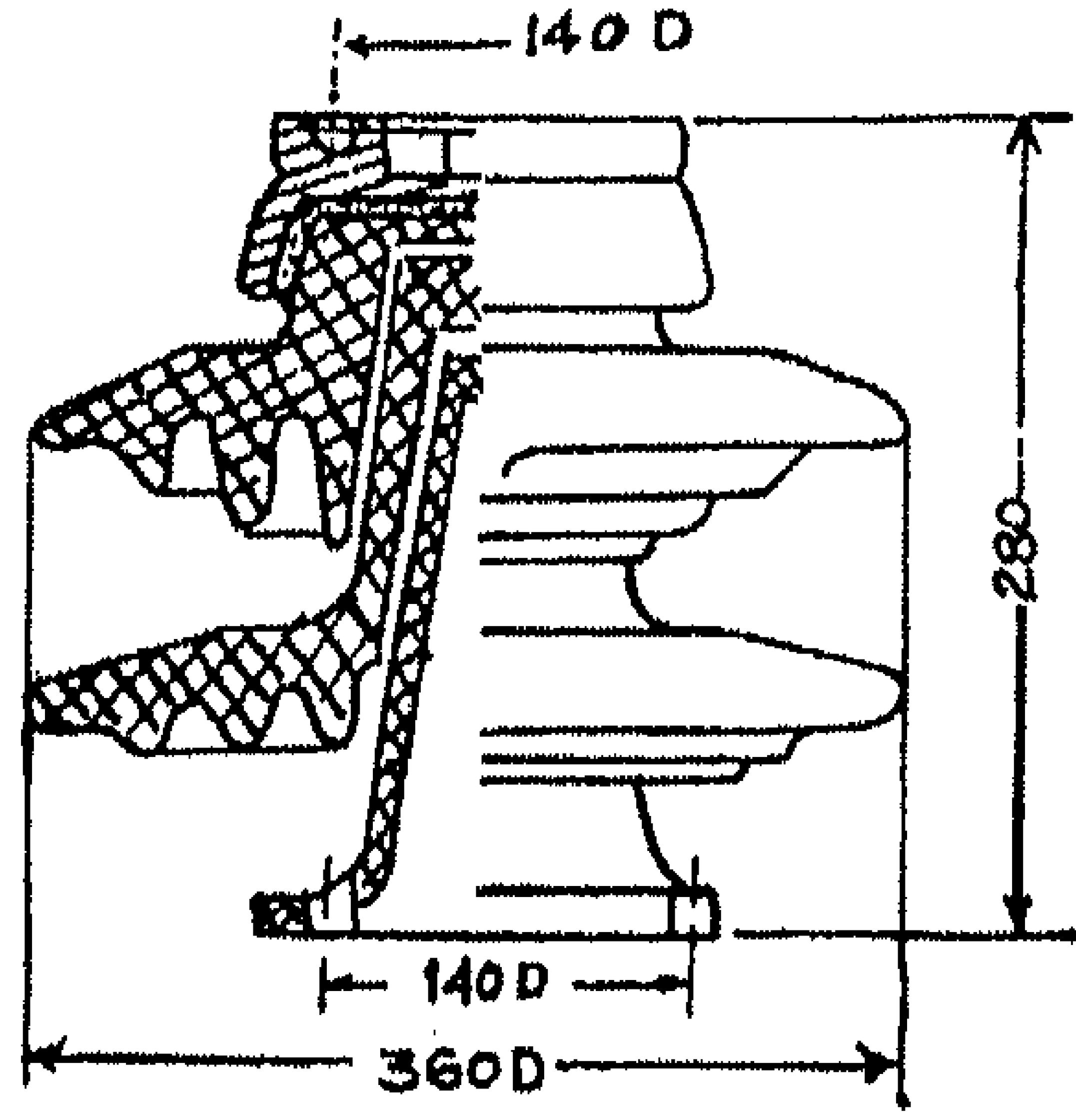


الشكل 8.1 : عوازل تعليق للمناطق ملوثة الجو. (a) لسلاسل الانفعال؛ (c, d) لسلاسل التعليق

عوازل التعليق المخصصة للاستخدام في المناطق الملوثة موضحة في الشكل 8.1 العازل الموضح في الشكل 8.1(a) يجد تطبيقاً واسعاً في سلاسل الانفعال strain strings. وله طول متزايد لمسار التسرب، بالإضافة فكل أسطحه متاحة للتنظيف بالأمطار والرياح. وبالنسبة لعوازل سلاسل التعليق في الشكل 8.1(b)، 8.1(c) فهي تستخدم في المناطق الملوثة أيضاً. في الشكل (b) وضعت تعرجات على السطح الخارجي وبسبب ذلك فإنها تنظف جيداً بواسطة الرياح والأمطار. أما

الشكل (c) فإن الزيادة في طول مسار التسرب فهي تتحقق بالتعرجات على السطح السفلي للأقراص.

تطوّر سطح العازل وازداد طول مسار التسرب بنفس الطريقة في العوازل المسمارية وخصصت للاستخدام في المناطق المتسخة أيضاً [الشكل 8.2].

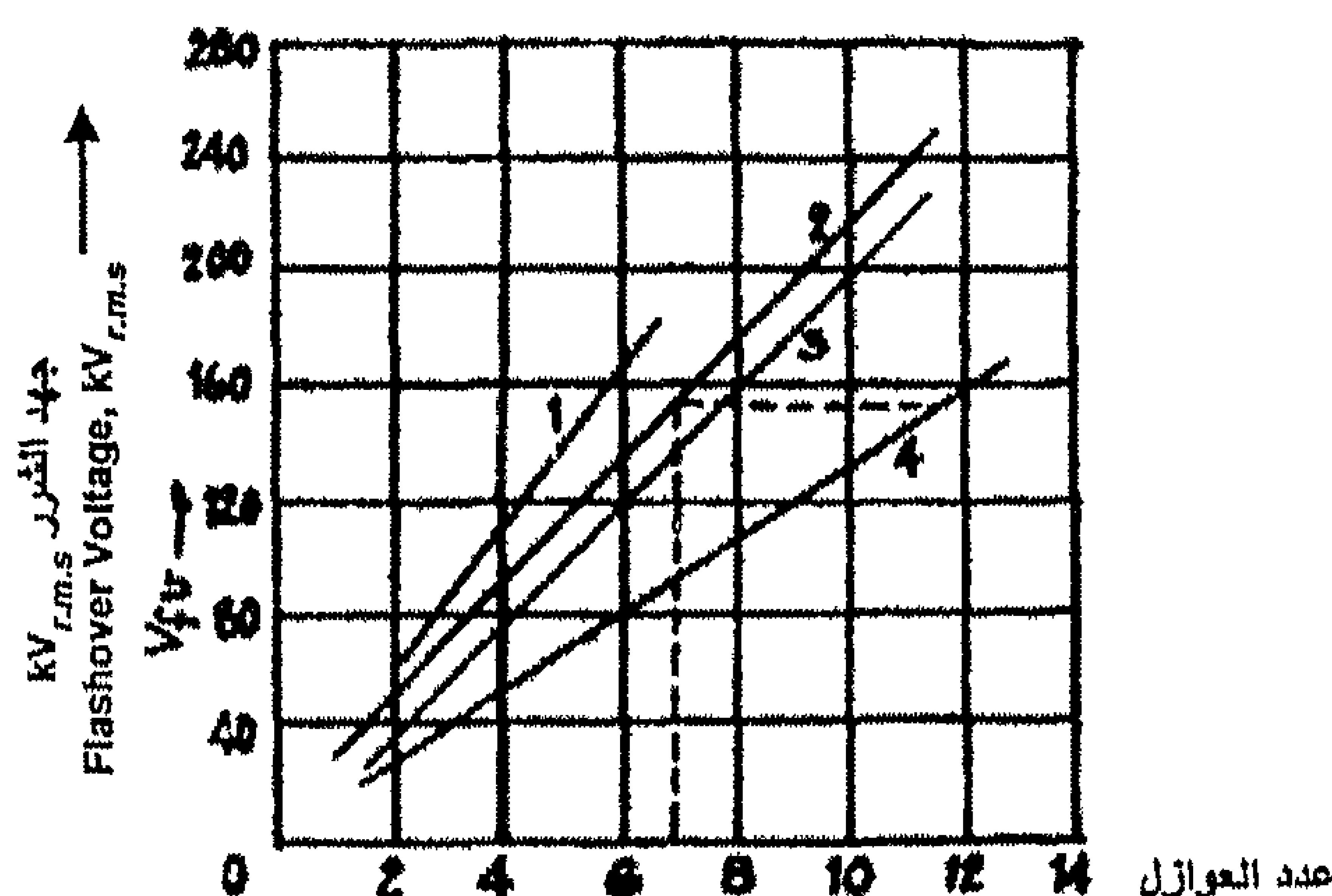


الشكل 8.2: عازل عمود مسماري للمناطق ملوثة الجو

فعالية استخدام عوازل خاصة موضحة في الشكل 8.3. مع نفس درجة التلوث والرطوبة تكون جهود شرر العوازل الخاصة 1.5 مرة تقريباً أكبر من العوازل العادية. ومع ذلك، كما سبق الذكر مع العوازل العادية فإن نفس النتيجة يمكن تحقيقها بزيادة عدد العناصر في السلسلة أو الأعمدة وبواسطة إطالة تنورات الجلب. فمثلاً من الشكل 8.3 نرى أن جهد شرر سلسلة من سبعة عوازل [الشكل 8.1(b)] لدرجة متساوية من التلوث تساوي جهد شرر سلسلة من إحدى عشر عازل قياسي من الطراز π-45.

في حالة الظروف الخطرة للتلوث، يمكن استخدام تسخين سطح العازل لزيادة جهود الشرر لعوازل الجهاز. ونتيجة للتسخين تتبخر الرطوبة المستقرة على السطح بسرعة وتصبح الأوساخ التي على العوازل جافة مما يعني أنها لا تمثل أي خطر. ويجب ملاحظة أن تلوث سطح جاف لعازل يصبح صعباً.

من المثير ملاحظة أن خبرة تشغيل الجلب المملؤة بالزيت العادية لمحولات القدرة وقواطع الدائرة في المناطق المتسخة تؤكد ذلك. ومن المعروف جيداً أن شرر عوازل المحولات يكون نادراً بينما جلب قواطع الدائرة بالزيت يحدث بها شرر غالباً. ويمكن شرح ذلك فقط بواسطة تسخين جلب المحول بالزيت، الذي يكون له درجة حرارة متزايدة أثناء تشغيل المحول.



الشكل 8.3: جهود شرر سلاسل وأعمدة من العوازل المختلفة في حالة تلوث بغازات فرق له قيمة $10\ \text{milligram/cm}^2$ مقابل عدد العوازل. (1) عازل عمود خاص [الشكل 8.2]؛ (2) عازل خاص [الشكل 8.1(b)]؛ (3) عازل خاص [الشكل 8.1(c)]؛ (4) عازل قياس طراز π-4, 5

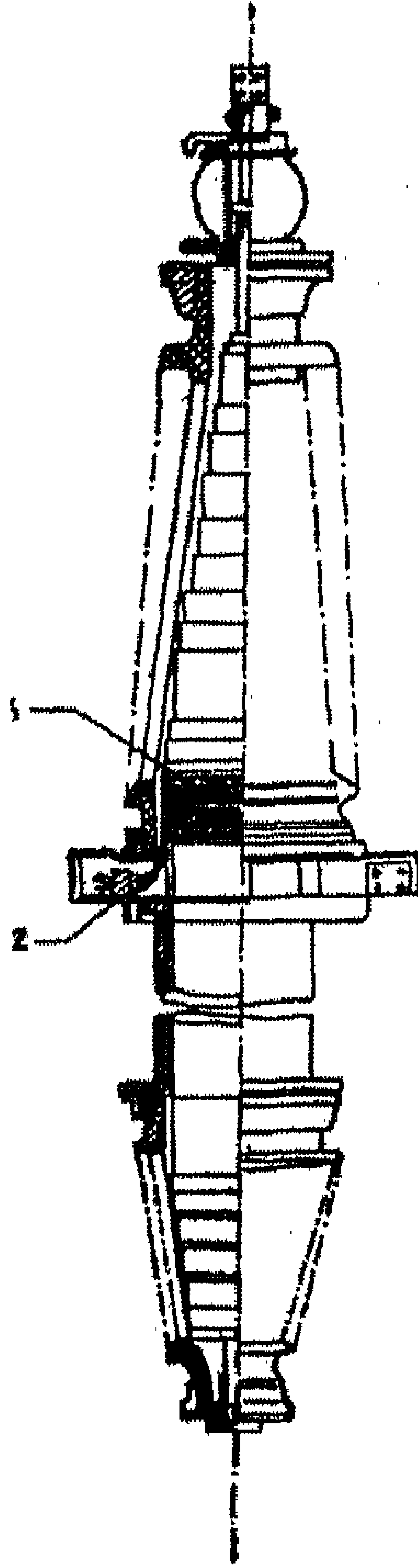
ويتم التسخين بسهولة في عوازل العمود ذات تجويف الهواء الداخلي المملوء بالزيت وكذلك في الجلب المملوءة بالزيت. الشكل 8.4 يوضح تركيب جلبة مع نظام تسخين يختلف عن العازل العادي فقط في أن الحجاب [الساتر] قد استبدل بحجاب المسخن 1 وفي الحجيرة المتوسطة يوجد صندوق أطراف إضافي 2 للمسخن. قدرة المسخنات ليست كبيرة [للعوازل 110 kV، 600 W] وفقد الطاقة يؤخذ في الاعتبار حيث إنها توصل فقط أثناء الظروف الميتالورجية الخطيرة، أي لمدة (30–20) hrs/year. وإلى جانب ذلك، فإن هذه الطاقة تغطى بتخفيض تيارات التسرب عبر العوازل أثناء تسخينها.

٨-٤ الخصائص الكهربية لعوازل الجهد d.c

Electrical Characteristics of Insulators at d.c Voltage

توزيع الجهد عبر عوازل سلسلة أو عمود عند جهد d.c، على النقيض منه عند جهد a.c، يحدد أساساً بواسطة مقاومات التسرب للعوازل والتي تعتمد على رطوبة الهواء المحيط. قيمة مقاومة السطح النوعية للبورسلين في ظرف جاف، نظيف يعتمد على رطوبة الهواء وينخفض من $\Omega\ (10^{12} - 10^{8})$ عند تتغير الرطوبة النسبية من %(90–0). ومع تزايد الرطوبة فإن تيارات التسرب عبر سطح العازل تزداد ويصبح توزيع الجهد أكثر انتظاماً. وإذا كانت مقاومة سطح العازل غير منتظمة بشكل حاد نتيجة أي أسباب مهما كانت [عدم انتظام التزجيج، تغير كبير عبر المقاومة بين التركيبات والعازل، ...إلخ]، فإنه يتوقع عدم انتظام لتوزيع الجهد. تساوي

توزيع الجهد ومنع حدوث الكورونا على الأجزاء المحملة للعازل أو على عوازل منفصلة موصلة على التوالي عند جهد d.c يكون ممكناً فقط بواسطة تغيير موصلية السطح لهم. والأخيرة يمكن أن تتحقق بالتأثير بتزجيج من مادة شبه موصلة.

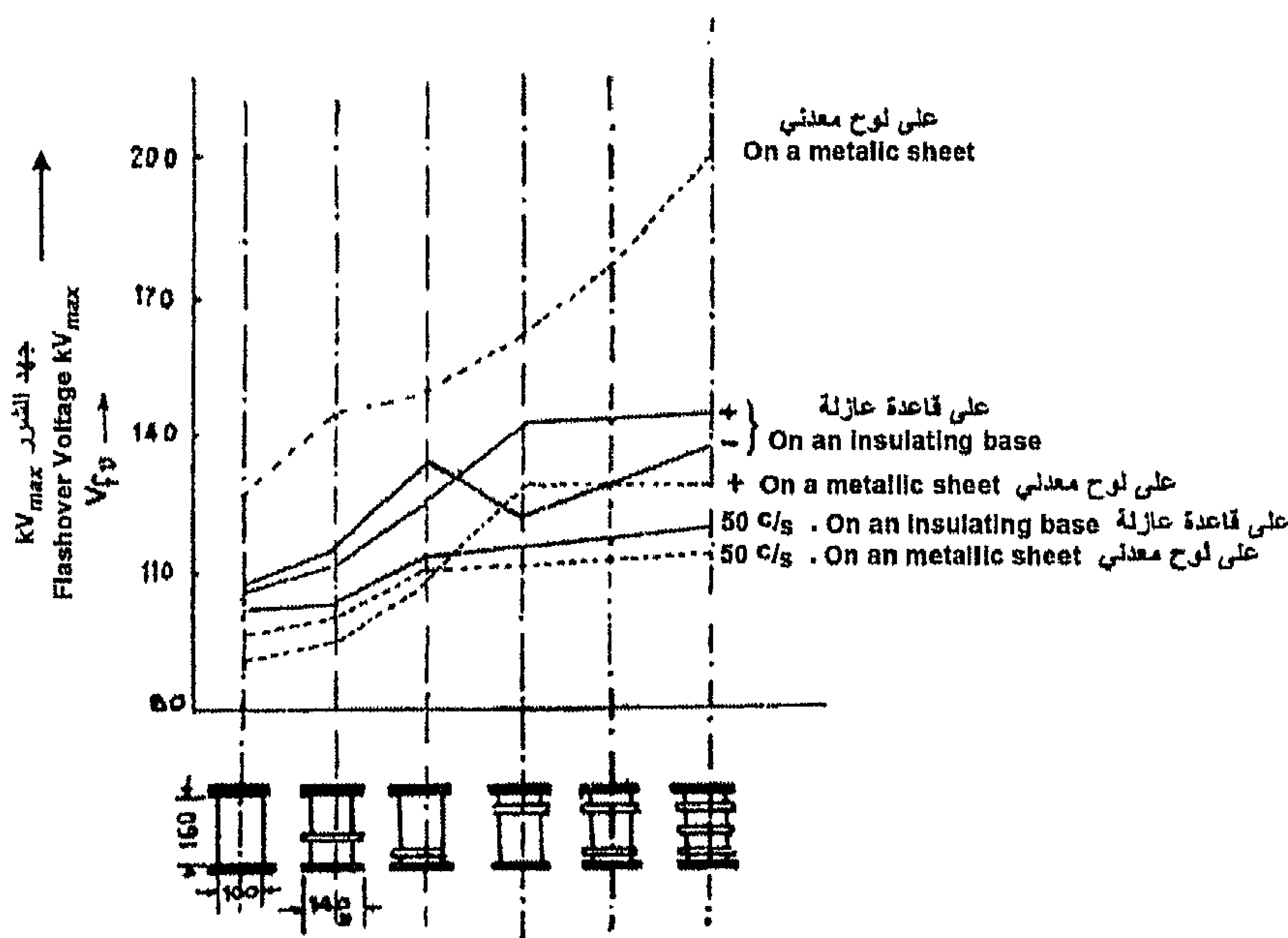


الشكل 8.4: عازل سلك واصل للمناطق الملوثة مزود بمسخن

جهود الشرر الجاف للعوازل عند جهد d.c، مثله عند جهد a.c أيضاً، تكون قريبة من جهود الانهيار لثغرات الهواء قضيب–قضيب أو قضيب–مستوى عند مسافة تفريغ للثغرات تساوي مسافة الشرر الجاف للعوازل.

ولا يحدد المجال الكهربي للعوازل بواسطة الشكل الجانبي profile للإلكترودات وبواسطة شحنات الحجم في الهواء المحيط فقط، بل أيضاً بواسطة الشحنات المستقرة على السطح. ويعتمد توزيع الشحنات على شكل هذا السطح وعلى رطوبة الهواء المحيط الذي يؤثر على مقاومة السطح للعوازل. والتأثير الأكبر للتعرجات على سطح العوازل على جهود الشرر لهم عند جهد d.c يشرح بوضوح بذلك. في الشكل 8.5 جهود الشرر المتحصل عليها لنماذج العوازل المركبة على لوح معدني أو على قاعدة عازلة أي مع اقتراب شكل المجال، في الحالة الأولى شكل المجال بين إلكترودات القضيب–المستوى وفي حالة الثانية بين إلكترودات القضيب–القضيب. نماذج العوازل لها نفس الارتفاع ولكن تختلف في عدد ومكان التعرجات. وكما نرى من هذا الشكل، فإن التعرجات الموجودة بالقرب من الإلكترودات تبذل أقصى تأثير على جهد الشرر.

الميزة الرئيسية لنمو التفريغ عبر سطح نظيف وجاف من العوازل عند جهد d.c هو الاعتماد الصغير جداً لجهد الشرر على سعة السطح. جهد شرر سلاسل عوازل التعليق عند جهد d.c يكون مساوياً تقريباً لسعة جهد الشرر 50 c/s .



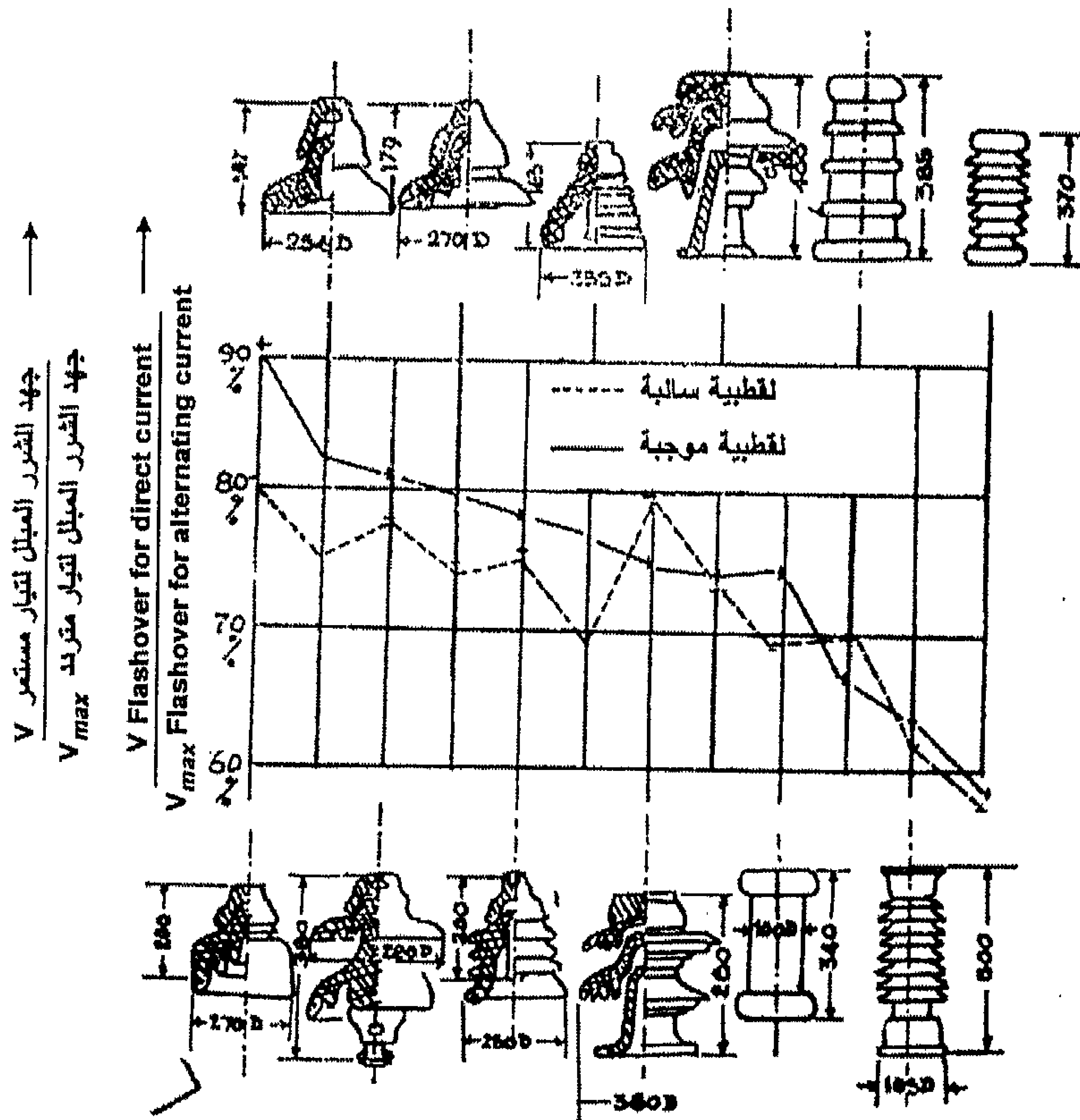
الشكل 8.5: جهد شرر نماذج من العوازل موجودة على لوح معدني أو على قاعدة عازلة عند جهد a.c أو d.c عند مواقع مختلفة للتعرجات على سطح العازل

نمو التفريغ عبر العوازل أثناء الأمطار يُصطحب بتيارات تسرب متقدمة التفريغ عبر السطح. وفي الأماكن ذات كثافة تيار التسرب الأعلى أو في الأماكن المبللة قليلاً بالأمطار، والتي يؤثر عليها جزء كبير من الجهد، يحدث تفريغات جزئية. وتنمو هذه التفريغات الجزئية في الطول عند زيادة الجهد المؤثر إلى قيمة مقابلة للشرر عبر سطح العازل كله. وحيث إنه عند الجهد d.c يكون القوس أكثر استقراراً، فإن نمو التفريغ يكون أسهل. لذلك، فإن جهود الشرر الجاف للعوازل عند الجهد d.c تكون أقل من تلك التي عند جهد a.c لتردد القدرة.

نسبة جهد الشرر المبلل عند جهد d.c إلى جهد الشرر المبلل لجهد a.c لأنواع مختلفة من العوازل معطى في الشكل 8.6 ومنه نرى أن العلاقة بين جهود الشرر المبلل عند تيارات d.c، a.c تعتمد على تركيب العوازل. وهذه النسبة هي الأقل للعوازل الاسطوانية والتي فيها يكون جهد الشرر عند جهد d.c مساوياً تقريباً لقيمة r.m.s لجهد الشرر المبلل 50 cycles .

جهد التشغيل لنوع معطى من العوازل يمكن إيجاده تقريباً بقسمة القيمة المطلقة لجهد الشرر المبلل عند d.c على 2 . فمثلاً، سلسلة من سبعة عوازل طراز π-4, 5 استخدمت عند جهد a.c هو 110 kV لها جهد شرر مبلل 260 $kV_{r.m.s}$ أي حوالي 370 kV_{max} . من

الشكل 8.6 لدينا نسبة جهود الشرر المبلل تساوي حوالي 0.75 أي أن جهد الشرر لهذه السلسلة عند d.c سيكون حوالي 280 kV، ولكي لا يحدث التفريغ الجزئي أثناء الأمطار، فإنه لهذه السلسلة يجب أن لا يكون جهد التشغيل d.c أكبر من 280/2 = 140 kV . هذا الجهد يكون أقل إلى حد ما من سعة الجهد a.c الذي تستخدم عنده هذه السلاسل. ويمكن أن يؤخذ كاسترشاد تقريبي أن العزل الخارجي للمعدة عند جهد d.c يقابل تقريباً لعزل المعدة عند تيار متردد a.c ذو سعة تساوي الجهد المستمر d.c.



الشكل 8.6: العلاقة بين قيمة جهد الشرر المبلل عند جهود d.c، a.c لأشكال مختلفة من العوازل

ويتحقق الاستقرار المباشر للعوازل التي تعمل عند جهد d.c، وأيضاً عند جهد a.c، بزيادة مسار التسرب. نسبة طول مسار التسرب إلى جهد التشغيل للعوازل التي تعمل في شروط التلوث الضعيف يجب أن لا تكون أقل من 1.5 cm/kV. وبالنسبة للعوازل التي تعمل في شروط تلوث عالي، فإن هذه النسبة يجب أن تساوي 2.5 cm/kV.



عزل المحولات والمولدات والكابلات والمكثفات

Insulation of Transformers, Generators, Cables & Condensers

٩-١ عزل محولات القدرة Insulations of Power Transformers

٩-١-١ معلومات عامة General Information

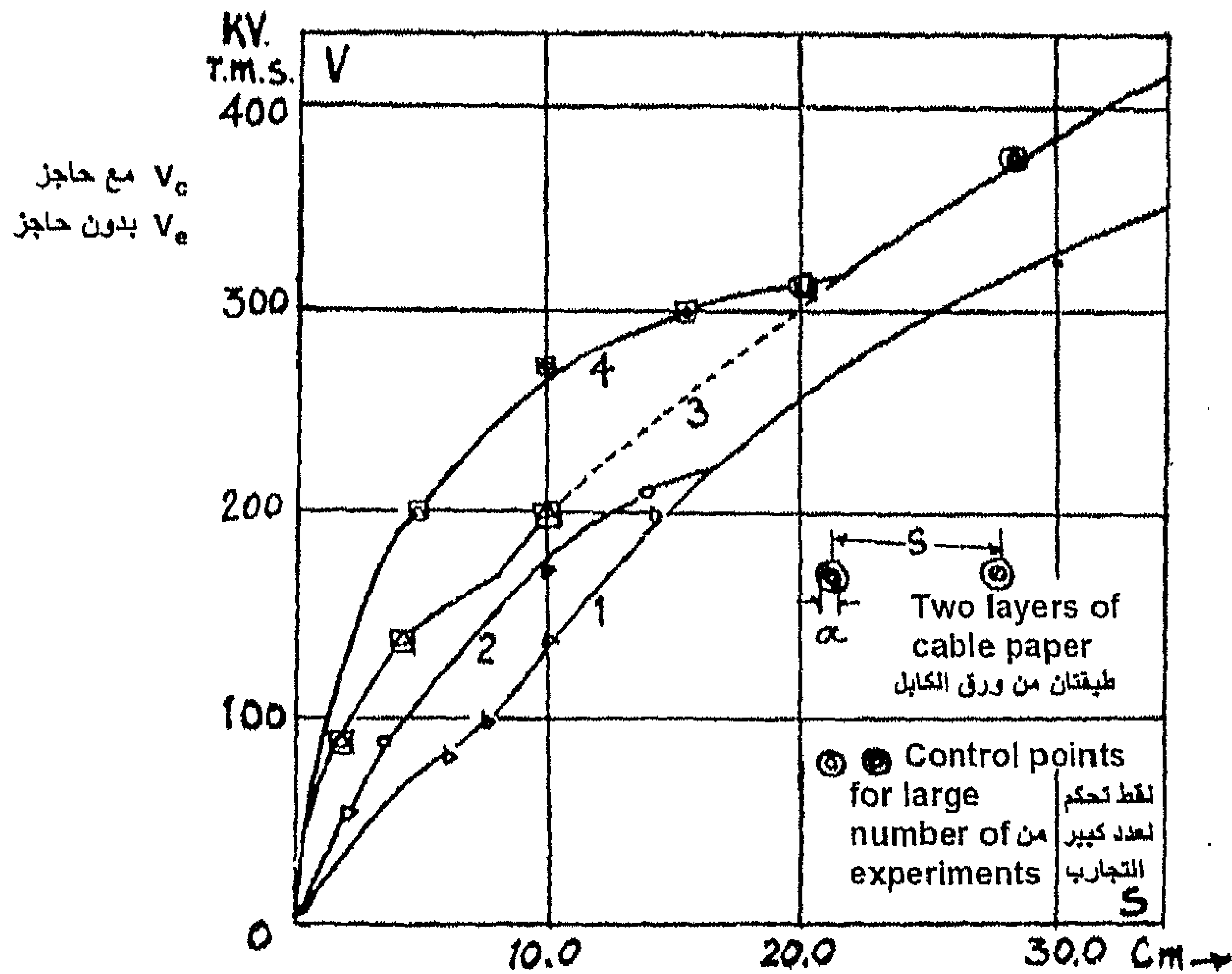
عزل محولات القدرة، وخاصة عند الجهود الاسمية الأعلى، يكون تركيب عزل معقد جداً. العناصر المنفردة للفائف المحول [اللفات، والملفات، والطبقات] يجب أن تعزل عن بعضها وعن الأرضي، أي عن القلب core، الخزان ولفات الجهد المنخفض. ويسمى النوع الأول "العزل الطولي" أو "الأصغر" minor والثاني "الأكبر" major أو "عزل المقطع المستعرض" cross sectional. الوسط العازل الرئيسي الأكبر وأيضاً العزل الطولي يكون زيت محول في اتحاد مع عوازل كهربية صلبة [بكاليت، ورق، شرائط قطنية لموصلات اللفات، ...إلخ].

في الفصل ٧ أثناء دراسة الجلب، تعاملنا مع عدد من المميزات التي يمتلكها اتحاد العوازل السائلة والصلبة. وفي عزل المحول يجب أن نميز بين ثلاثة أنواع رئيسية لتطبيق العوازل الكهربية في الزيت: التغطية، والعزل، والفواصل [الحواجز].

التغطية Covering

هي الاسم المعطى لطبقات رفيعة نسبياً [السمك لا يكون أكبر من mm (1–2)] من المواد الصلبة العازلة [عادة تكون الورق أو الورنيش العازل] الذي يلتصق بمعدن الإلكترود ولا يغير بشكل ملحوظ من شدة المجال الكهربي في محيطه. وهذا الإجراء يكون فعالاً جداً عند تردد القدرة، وخاصة في تلك الحالة التي يكون عندها الزيت ملوث بألياف ورطوبة. تأثير التغطية موضح بمنحنيات الشكل 9.1 المتحصل عليها في زيت ذات متانة كهربية مخفضة. ومن المنحنيات نرى

أن التغطية تكون فعالة في المجالات غير المنتظمة قليلاً [المسافة بين الإلكترودات صغيرة] عندما تصل الزيادة في جهد التثقب 50% وأكثر. ويرتبط التأثير المفضل لتغطية الإلكترودات بالانخفاض الحاد في احتمال تكون قناطر موصلة مستقرة حيث إن الجسيمات الموصلة لا تستطيع أن تبقى على سطح إلكترود مغطى بعازل كهربي.



الشكل 9.1: تأثير تغطية الإلكترود بطبقة رقيقة من العازل عند 50 c/s . (1) قطر 3 mm بدون تغطية؛ (2) قطر 10 mm بدون تغطية؛ (3) قطر 3 mm بتغطية بطبقتين من ورق الكابلات؛ (4) قطر 10 mm بتغطية طبقتين ورق كابلات

العزل Insulation

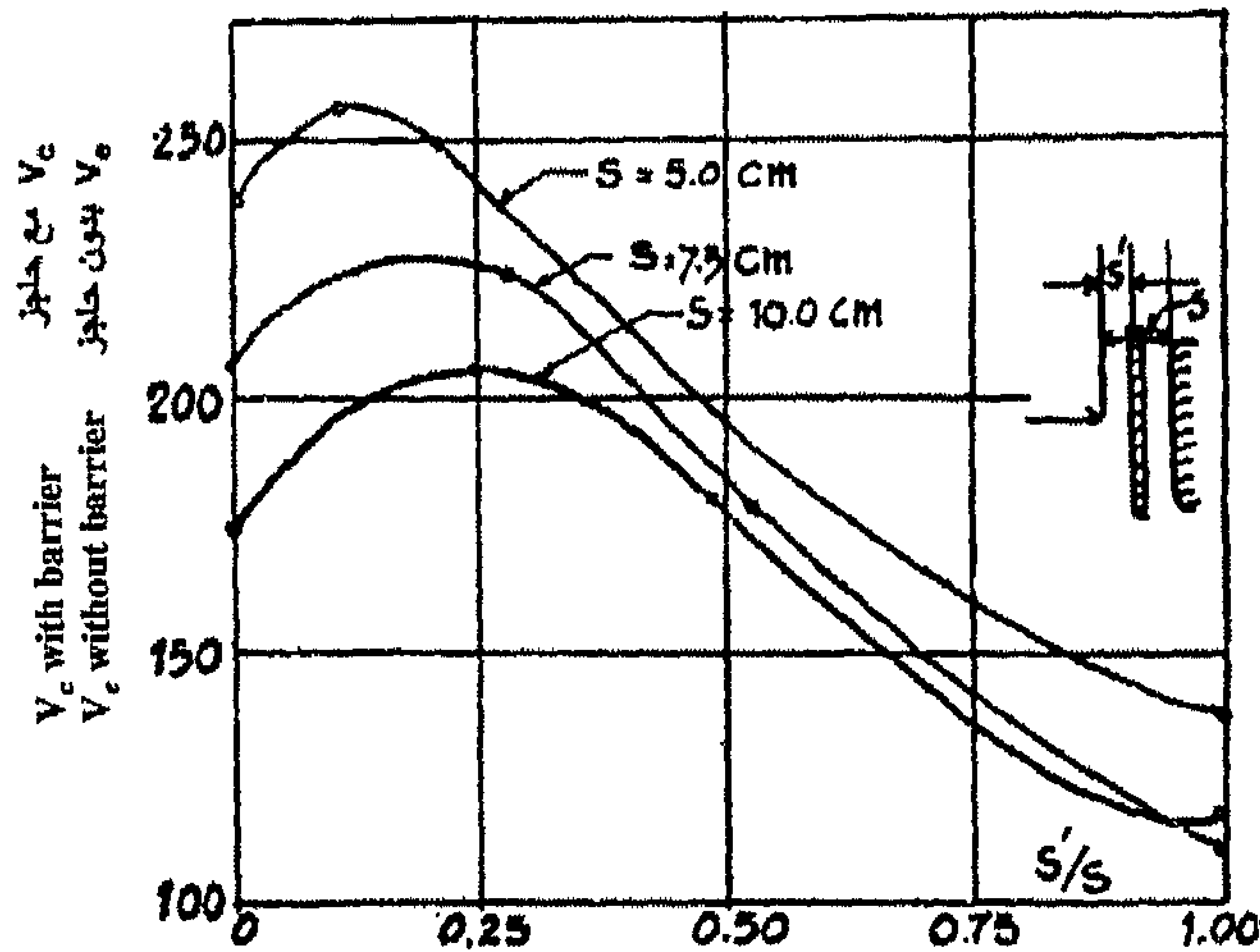
وهو يختلف عن التغطية بسمك طبقة العازل الكهربي الأكبر [حتى عشرات الملليمترات]، ووجوده يخفض بشكل ملحوظ شدة المجال في جوار الإلكترود. وبالتعارض مع التغطية، يكون مطلوب التأثير بعزل في المجالات غير المنتظمة بقوة حيث إن هذا الإجراء يحسن من تساوي توزيع المجال الكهربي.

الفواصل [الحواجز] Partitions [Barriers]

وهي تصنع في المحولات من ألواح مكبوسة كهربية من الورق المبكلت أو الغير fabric على شكل

ألـواح، اسـطوانات، أنابيـب، ورد والتفاصـيل المـشكلة الأخـرى. وتطبـق الفواصـل في كـل مـن المجالات الضعيفة وعديمة الانتظام بحدة –ومع ذلك– يختلف تأثيرها في كل حالة.

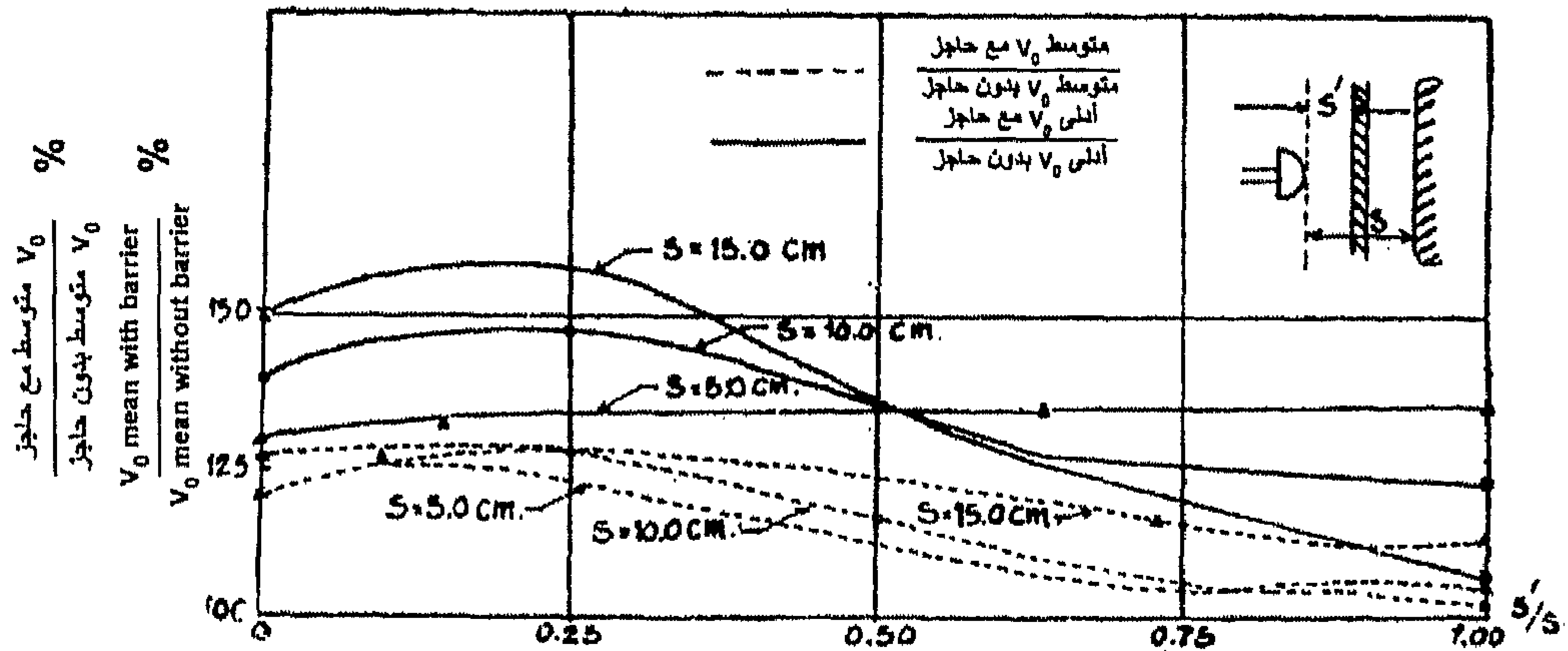
ففي المجالات عديمة الانتظام الحاد تلعب الفواصل المصنوعة من العوازل الكهربيـة الـصلبة نفس دور الحواجز في أي ثغـرة غازيـة. لـذلك، فإنهـا يجـب أن توضـع في منطقـة أقـصى شـدة مجال. من منحنيات الشكل 9.2 نرى أن حاجز رفيع في الزيت يزيد جهد التثقب عند 50 c/s إلى مرتين أو أكثر أي تقريباً بنفس النسبة كما في الهـواء. ومـع ذلـك، ففـي وجـود حـاجز فـإن التأين في منطقة أعلى شدة مجال يحدث عند جهود أقل من جهد التثقب. التواجد الممتد للتأين يكون غير مسموح لأنه لا يحلل الزيت فقط بل أيـضاً يـسبب تـدمير تـدريجي للحـاجز. لـذلك، يمكن أن تستخدم هذه الطريقة فقط لزيادة جهود التثقـب في حالـة الجهـود المـؤثرة لـزمن قـصير [جهود زائدة].



الشكل 9.2: تأثير حواجز مستوية رقيقة على جهد تثقب الزيت في مجال غير منتظم بحدة عنـد 50 c/s . لوح الحاجز سمكه 2.5 mm؛ متانة العازل الكهربي للزيت هي $18\ kV_{r.m.s}$ / 2.5 mm

في الشكل 9.2 البيانات المرتبطـة بـالحواجز المـستوية الـتي تـضمن أكـبر تـساوي للمجـال بـين الحاجز والمستوى معطاة. مثل هذا الحاجز يجب أن يكون له أبعـاد كـبيرة لكـي يمنـع التفريـغ مـن حافة الحاجز. في المحولات الفعلية، نهدف إلى الحفاظ على أبعاد العـزل صـغير مـا أمكـن وبالتـالي فإن الحواجز المشكلة التي تساوي المجال إلى درجة أقل يجب أن تستخدم. ولكي يمكن حفـظ متانـة كهربية عالية كافية مع الحواجز المشكلة يتم استخدام قليل منهم عند الجهود الاسمية الأعلى.

في المجالات المنتظمة نسبياً تؤدي الحواجز وظيفة أخرى، وهي مقاومة تكون القناطر الموصلة في الزيت. لذلك، في الزيت النقي يكون تأثير الحاجز ليس كبيراً ولكن مع ظهور المخلوطات الليفية في الزيت والتي تكون دائماً موجودة في المحولات، يزداد الفعل الواقي للحواجز. زيادة أدنى جهد تثقب عند استخدام حاجز في مجال ضعيف في عدم الانتظام موضح في منحنيات الشكل 9.3.

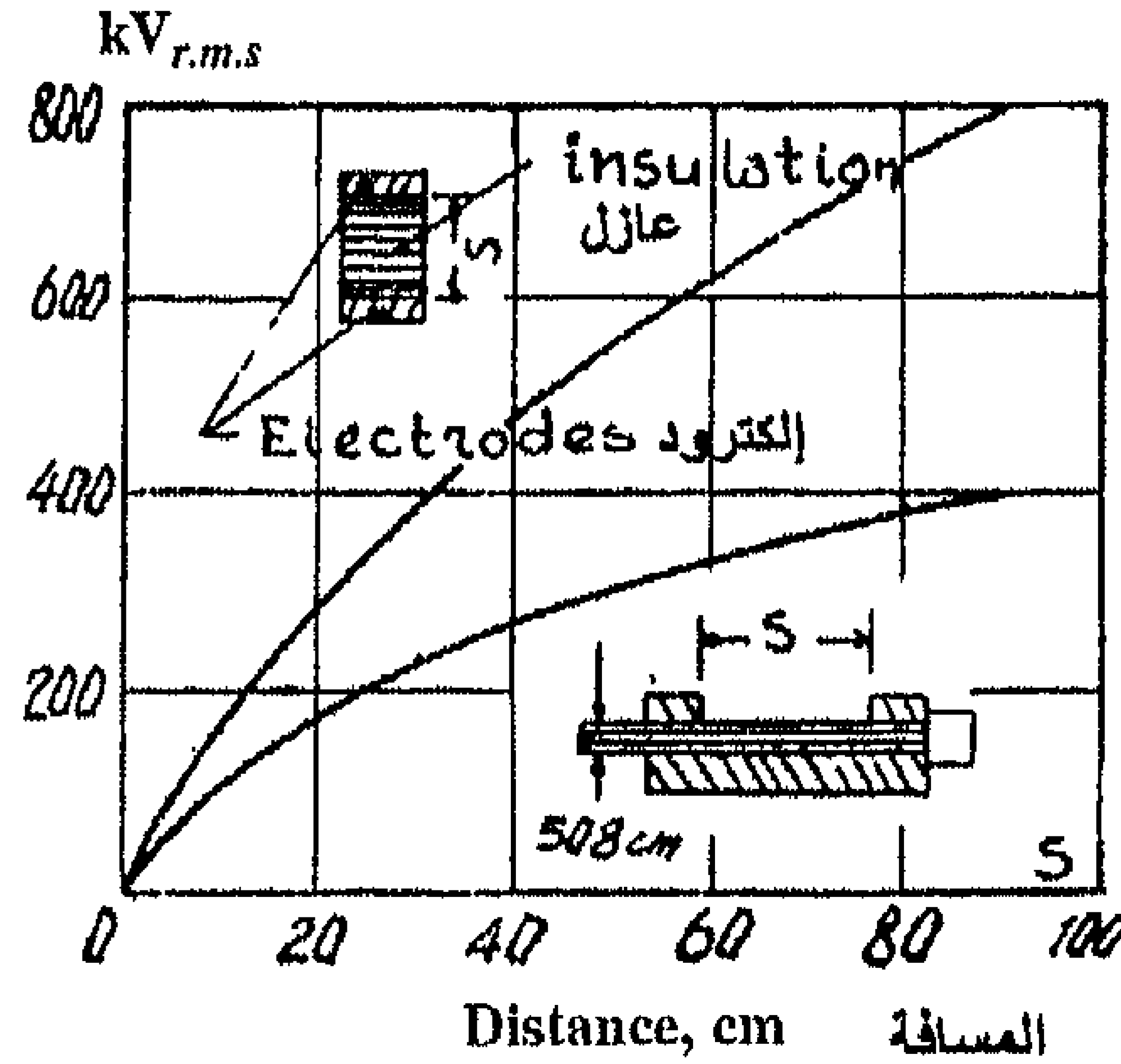


الشكل 9.3: تأثير حاجز مستوى رقيق على متانة التثقب للزيت في مجال منتظم نسبياً عند 50 c/s .
الحاجز: لوح كرتون كهربي سمكه 2.5 mm، متانة عزل الزيت kV/2.5 cm (20–25)

كل ما سبق يتعلق بالحواجز الرقيقة، والتي يكون سمكها أقل كثيراً من الثغرات في الزيت. وإذا جعلنا سمك الحاجز قريباً من ثغرات الزيت، فإن تأثيرها يمكن أن يكون سالباً بسبب الزيادة في شدة المجال في الزيت التي لها منفذية عزل كهربي أصغر مقارنة مع العازل الكهربي الصلب. وعلاوة على ذلك، لا يُسمح للحواجز أن تُصنَع رقيقة جداً –فأولاً وقبل كل شيء– من اعتبارات المتانة الميكانيكية. مع تكوّن القناطر الموصلة –حتى إذا تواجدت لزمن قصير فقط– فإن جزء كبير من الجهد يؤثر على الحاجز الذي يجب أن يكون له متانة كهربية عالية وكافية. لذلك، تستخدم حواجز ذات سمك mm (9–4) في عزل المحول كقاعدة.

العوازل الكهربية الصلبة في عزل المحول غالباً ما تؤدي وظائف ميكانيكية صرفة. التفريغ السطحي في الزيت يكون ممكناً عبر تلك العوازل الكهربية. جهد الشرر عبر سطح العازل الصلب في الزيت –كما في الهواء أيضاً– يعتمد على شكل المجال الكهربي –وقبل كل شيء– على وجود المركبة العمودية لشدة المجال الكهربي. وهذا موضح في منحنيات الشكل 9.4 حيث

جهود شرر من نوعين موضحين. وكما نرى فإن وجود المركبة العمودية لشدة المجال الكهربي تخفض جهد الشرر إلى حد ما.

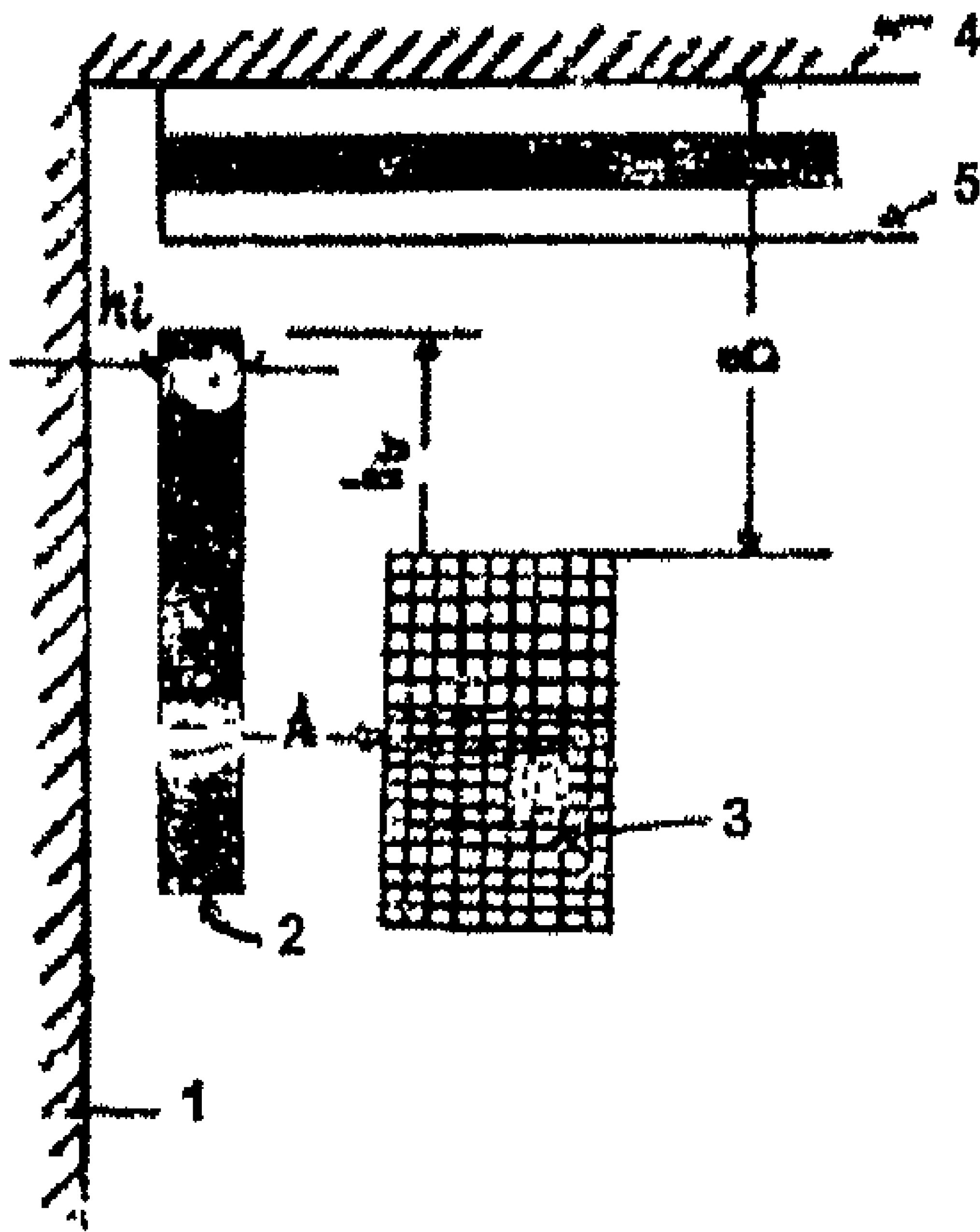


الشكل 9.4: القيم المتوسطة لجهد الشرر عبر سطح عازل في الزيت عند 50 c/s في حالة مركبة عمودية صغيرة وكبيرة لشدة المجال الكهربي

٩-١-٢ تركيب عزل محولات القدرة Construction of Insulation of Power Transformer

في الشكل 9.5 موضح نظام للعزل الرئيسي [الأكبر] لمحولات عند جهد 35 kV فأقل. وهذا العزل يتكون من ثغرة زيت مقسمة بواسطة حاجز. وتحدث شدة المجال الأكبر عند حافة لفات الجهد العالي. لذلك، فإن الاسطوانة 2 والحلقة [الوردة] 5 يجب أن يكون لها أبعاد كافية لكي تجعل نمو التفريغ من هذه النقطة صعباً. الأبعاد الأساسية للعزل معطاة في الجدول 9.1.

في الشكل 9.5 لفات الجهد المنخفض غير موضحة، العزل بالنسبة لهذه اللفات يتم بنفس الطريقة كما في العزل بالنسبة لعضو القلب الحديد limb of core.



الشكل 9.5: العزل الرئيسي للفات الداخلية لفئة العزل حتى 35 kV . (1) عضو القلب الحديد؛ (2) اسطوانة عازلة؛ (3) لفات الجهد العالي؛ (4) مِقْرَن؛ (5) عزل القرن

الجدول 9.1: الأبعاد الرئيسية للعزل الرئيسي للمحولات

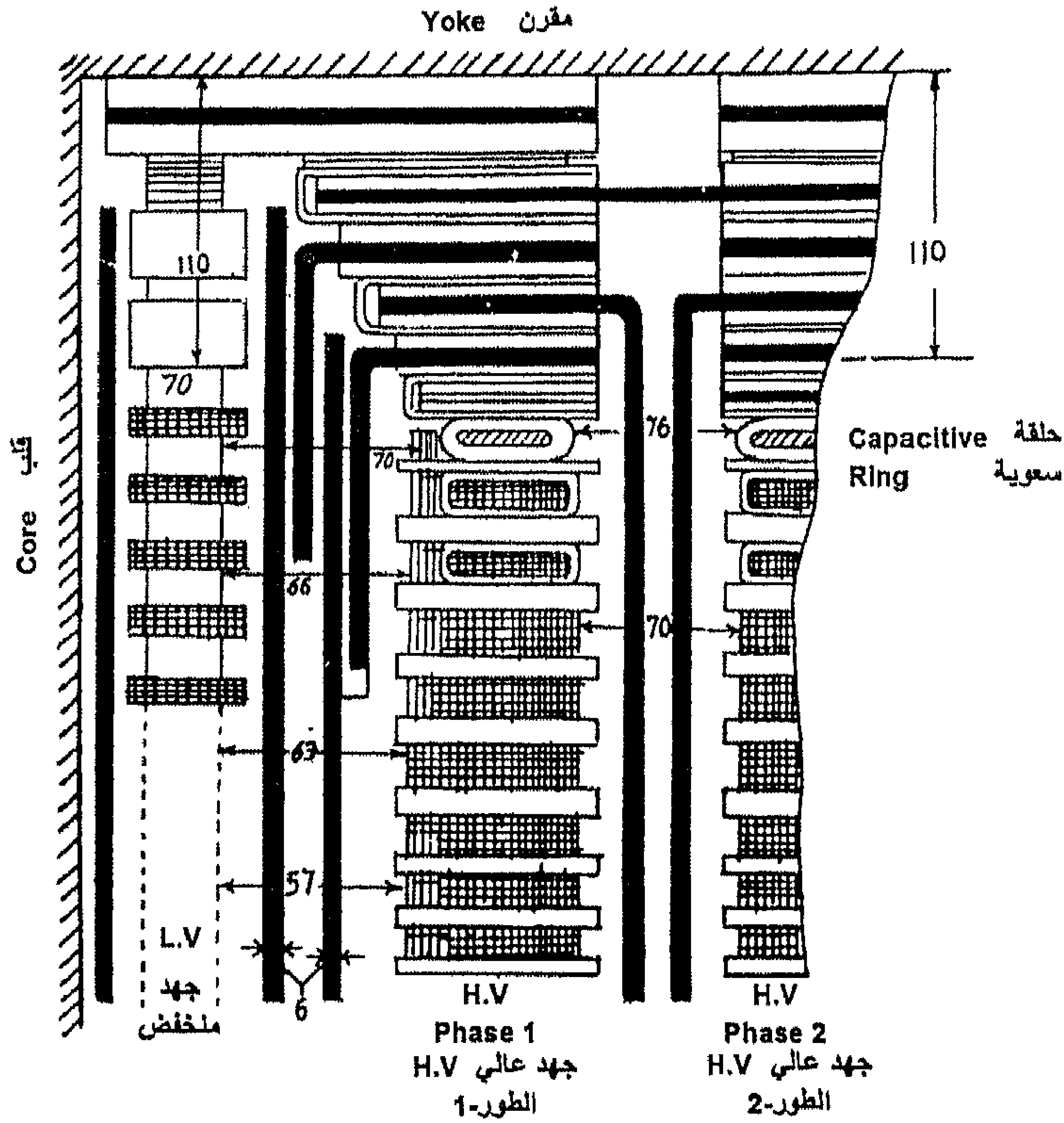
فئة جهد اللفات	A المسافة حتى عضو القلب الحديد (mm)	B المسافة حتى المِقْرَن (mm)	عدد الاسطوانات العازلة وسمكها (mm)	جهد الاختبار ($kV_{r.m.s}$)
3–6	8–10	20–25	1×2.5	25
10	10–12	25–30	1×3	35
35	27–30	70–80	1×5	85
110	57–67	110	2×6	200
150	95–110	180	3×6	275
220	130	260	4×6	400

ملحوظة: الأبعاد B للمحولات kV (110–220) تكون للحالة عندما يقدم الجهد في بداية اللفات. وعندما يقدم الجهد عند منتصف اللفات والمحولات تعمل في نظام مؤرض التعادل، فإن البعد B مثلاً للمحولات 220 kV يمكن أن ينخفض إلى 110 mm، بالنسبة لمحول 110 kV إلى mm (70–80).

عند جهود أعلى يزداد عدم انتظام المجال عند حافة لفات الجهد العالي وبسبب ذلك يصبح تركيب هذه الأركان من العزل أكثر تعقيداً. في الشكل 9.6 موضح تركيب العزل الرئيسي لمحول 110 kV الشروط غير محببة عند حافة أي لفائف تجبرنا على استخدام ورِّد أركان تبعد إمكانية نمو التفريغ عن حافة اللفات تماماً عبر ثغرة الزيت. عبر كل مسارات التفريغ المكنة يوضع حاجزان أو أكثر من عازلات كهربية صلبة. ولجهود أعلى علينا أن نستخدم عدد أكبر من ورد [حلقات] الأركان والاسطوانات. وبذلك يصبح تركيب اللفات أكثر تعقيداً.

في المحولات المخصصة للعمل في أنظمة مؤرضة التعادل، يمكن أن يبسط العزل إذا تم تقديم الجهد في مركز اللفات. في هذه الحالة تكون اللفات مقسمة إلى اثنان أو أربعة أفرع كل الأطوار تربط معاً وتشكل تعادل المحول. وحيث في الأنظمة ذات التعادل المؤرض يكون الجهد على التعادل لكل المحولات ليس كبيراً، فإن عزل طرف اللفة بالنسبة للأرض يمكن أن ينخفض. وبهذه الطريقة تكون معظم الشروط غير المحببة من وجهة نظر شكل المجال الكهربي هي نقط اللفات التي عند الجهد الأقل بالنسبة للأرض. وهذه الحقيقة تسهل من تصميم العزل. المثال في الشكل 9.7 يوضح رسم تخطيطي للنظام الداخلي لمحول ثلاثي اللفات 220/110/35 kV، هنا للفات 220 kV جلب في المركز. عزل تعادلات لفات 220 kV، 110 kV تنفذ عند خطوة واحدة

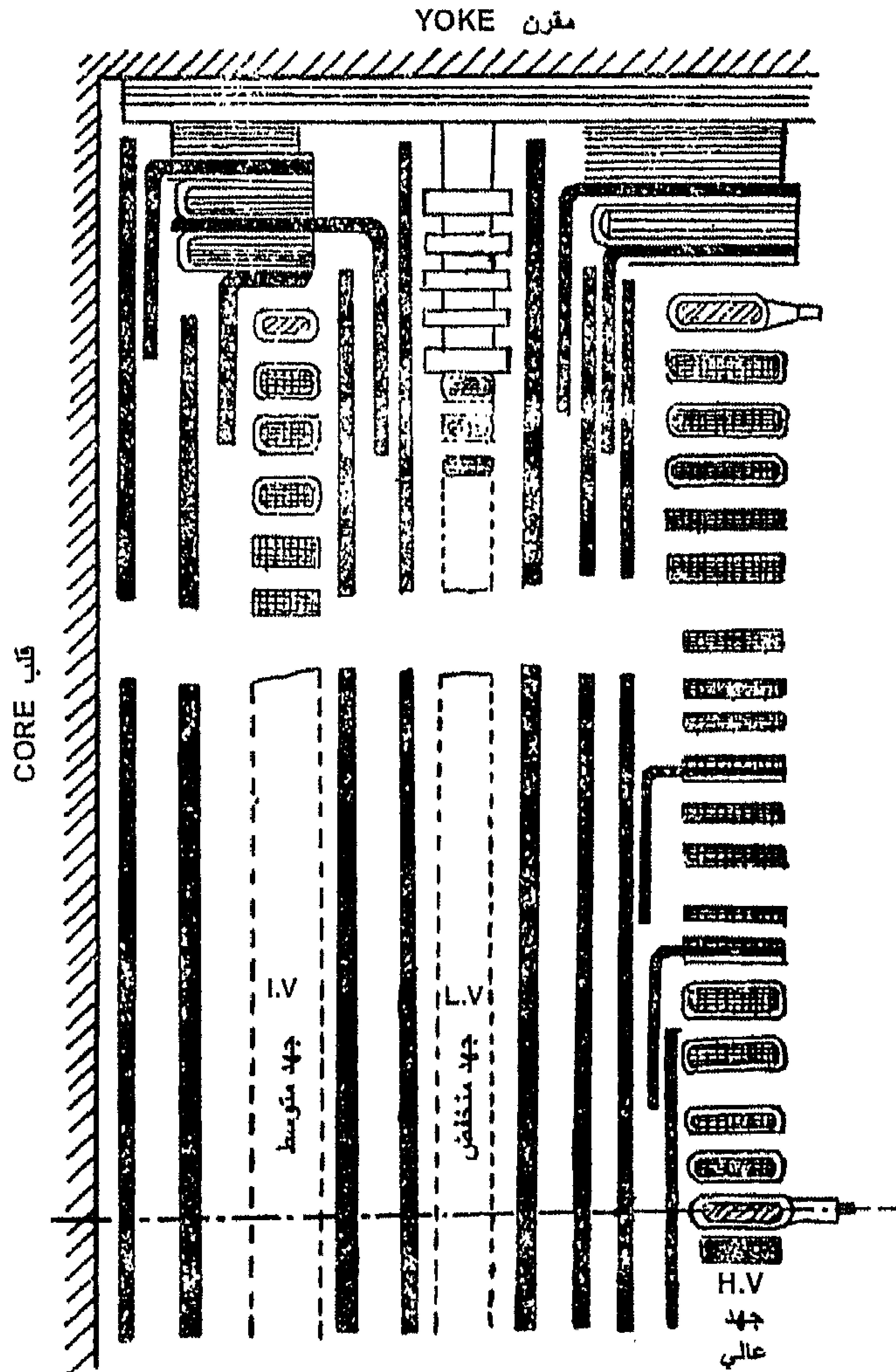
لأسفل -مثلاً- تعادل لفات 220 kV تُعزل مثل لفات طرف الخط 110 kV . وهنا يكون من الممكن ليس تأريض تعادلات جزء من المحولات في النظام للحد من تيار دائرة القصر، ولكن مانعات الصمام الأوتوماتية التي تحقق المطالب الخاصة المتعلقة بالتشغيل، جهود الإثارة والجهود المتخلفة يجب أن تركب في تعادلات هذه المحولات.



الشكل 9.6: تركيب عزل رئيسي لمحول 110 kV له جهد اختبار 230 kV

في الجدول 9.1 الأبعاد الرئيسية لعزل حاجز-الزيت تم الحصول عليها على أساس البحوث المعملية وتم تبنيها في الاتحاد السوفيتي السابق هي المعطاة.

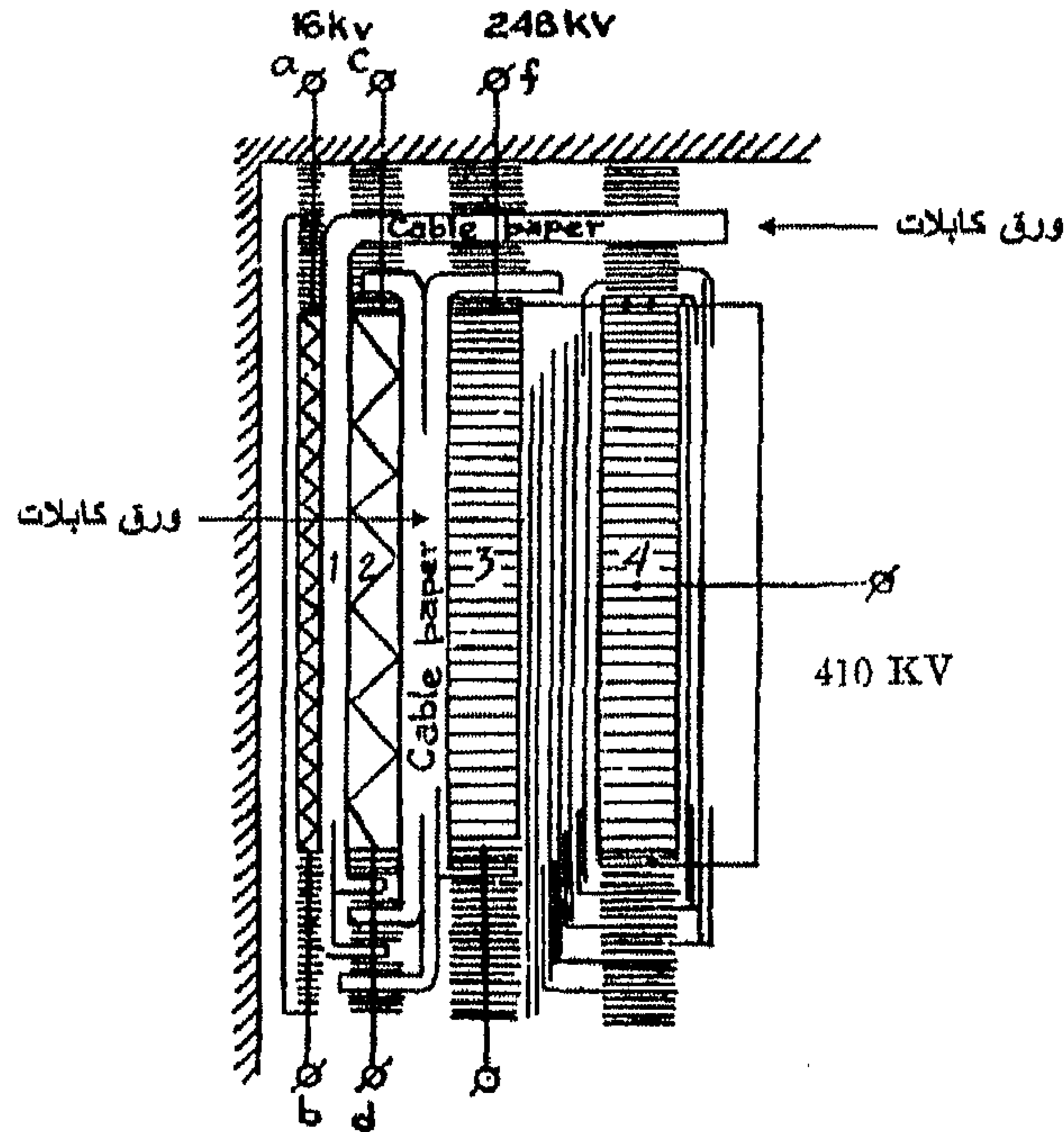
حديثاً في صناعة المحولات إلى جانب عزل حاجز-الزيت، استخدم أيضاً عزل مصنوع من ورق الكابلات. موضح في الشكل 9.8 نظام عزل لمحول-ذاتي auto-transformer مصنع بواسطة شركة Erlikon السويسرية. لفات الـ 400 kV لهذا المحول لها جلب في المركز وتستخدم عزل حاجز-زيت. لفات الـ 220 kV واللفات المنظمة تكون مزودة بعزل ورق كابلات لمنع حدوث التفريغ من حافة اللفات.



الشكل 9.7: كروكي لعزل محول من ثلاث لفائف له جهد عالي 220 kV وجهد اختبار 460 kV

العزل الطولي [الأصغر] للمحولات Longitudinal Insulation of the Transformers

العزل الطولي لمحول يكون –عامة– مرتب بنفس طريقة العزل الرئيسي. موصلات اللفات المستخدمة في المحولات –كقاعدة– يكون لها شريط قطن يخدم كعازل بين اللفات. العزل بين الملفات أو بين الطبقات يكون إما من ورق كابلات أو على شكل قنوات زيت مع فواصل من عوازل صلبة. في الشكلين 9.6، 9.7 –إلى جانب العزل الرئيسي– موضح أيضاً نظام من العزل بين الملفات. ومع ذلك، فإن تحديد المسافات العازلة الأساسية للعزل بين الملفات يتطلب تحليلاً إضافياً.



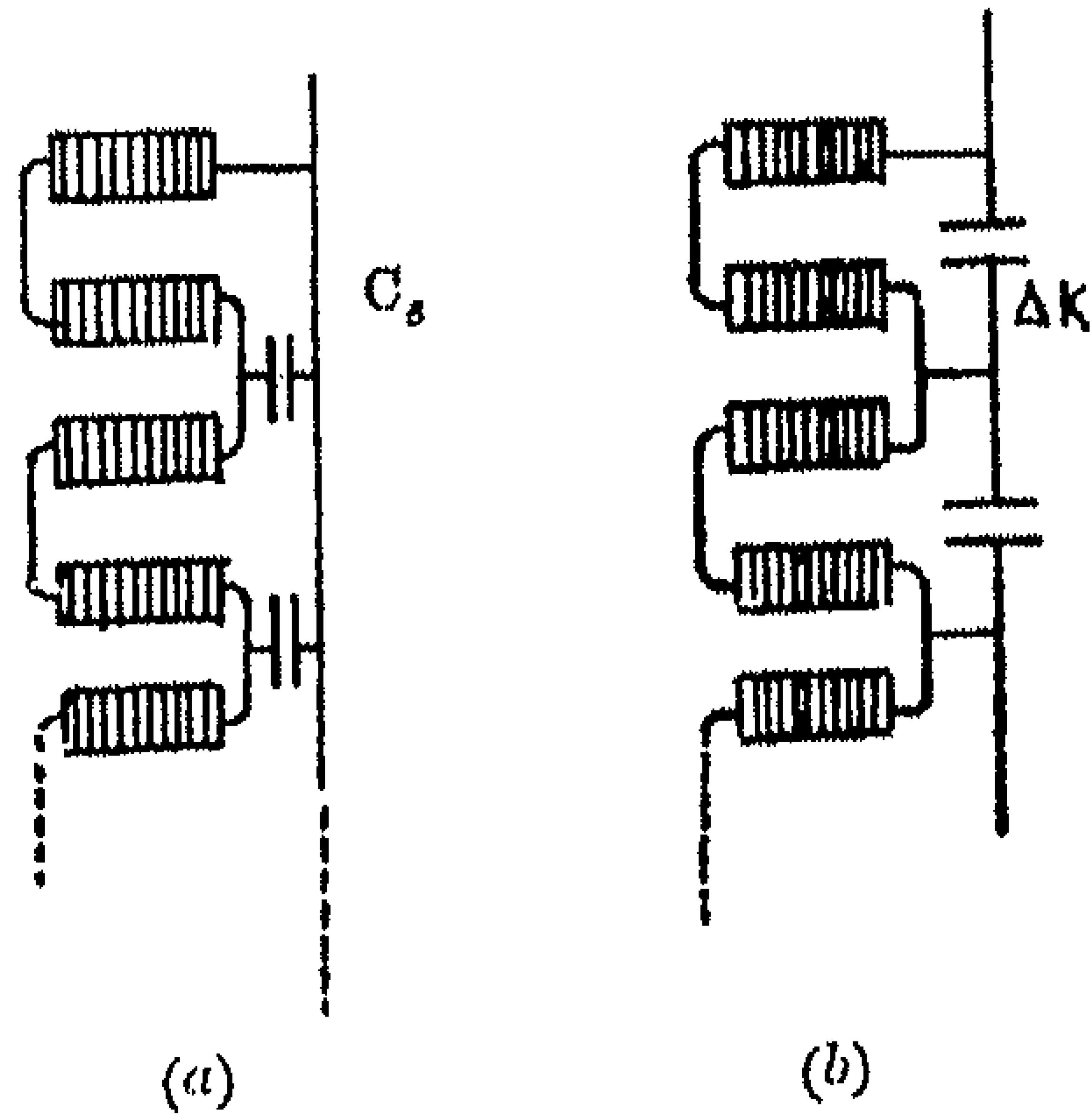
الشكل 9.8: نظام محول "إرليكون" 220/400 kV .
(1) لفائف إضافية؛ (2) لفات طبقة منظمة؛
(3) لفات 220 kV؛ (4) لفات 400 kV

في حالة العوازل التي سبق مناقشتها، تحدد الجهود المؤثرة على الأجزاء المنفردة للعازل كلياً بواسطة الجهود الزائدة التي تحدث في النظام نفسه. في المحولات، ظاهرة الانتقاليات العابرة تعتمد طبيعتها كثيراً على النظام الداخلي للمحول، الذي ينشأ تحت تأثير الجهود الزائدة في النظام. لذلك، فإن الجهد المؤثر على العناصر المنفردة لعزل المحول تعتمد ليس فقط على قيمة الجهود الزائدة بل أيضاً على تركيب اللفات نفسها. ويرتبط ذلك بالعزل الطولي، والجهد المصمم له المحول. ولكي نفهم هذه الفكرة يجب الإلمام بعملية العابرات transients في لفات المحول.

٩-١-٣ الحماية الداخلية للمحولات Internal Protection of Transformers

السبب الرئيسي للجهود-الزائدة على العزل الرئيسي والطولي للمحولات هو الطبيعة غير المفضلة للتوزيع الابتدائي للجهد عبر اللفات. لذلك لكي نحسن الشروط التي يعمل فيها العزل، فمن الضروري جعل التوزيع الابتدائي للجهد منتظماً ما أمكن بمساعدة إجراءات صناعية.

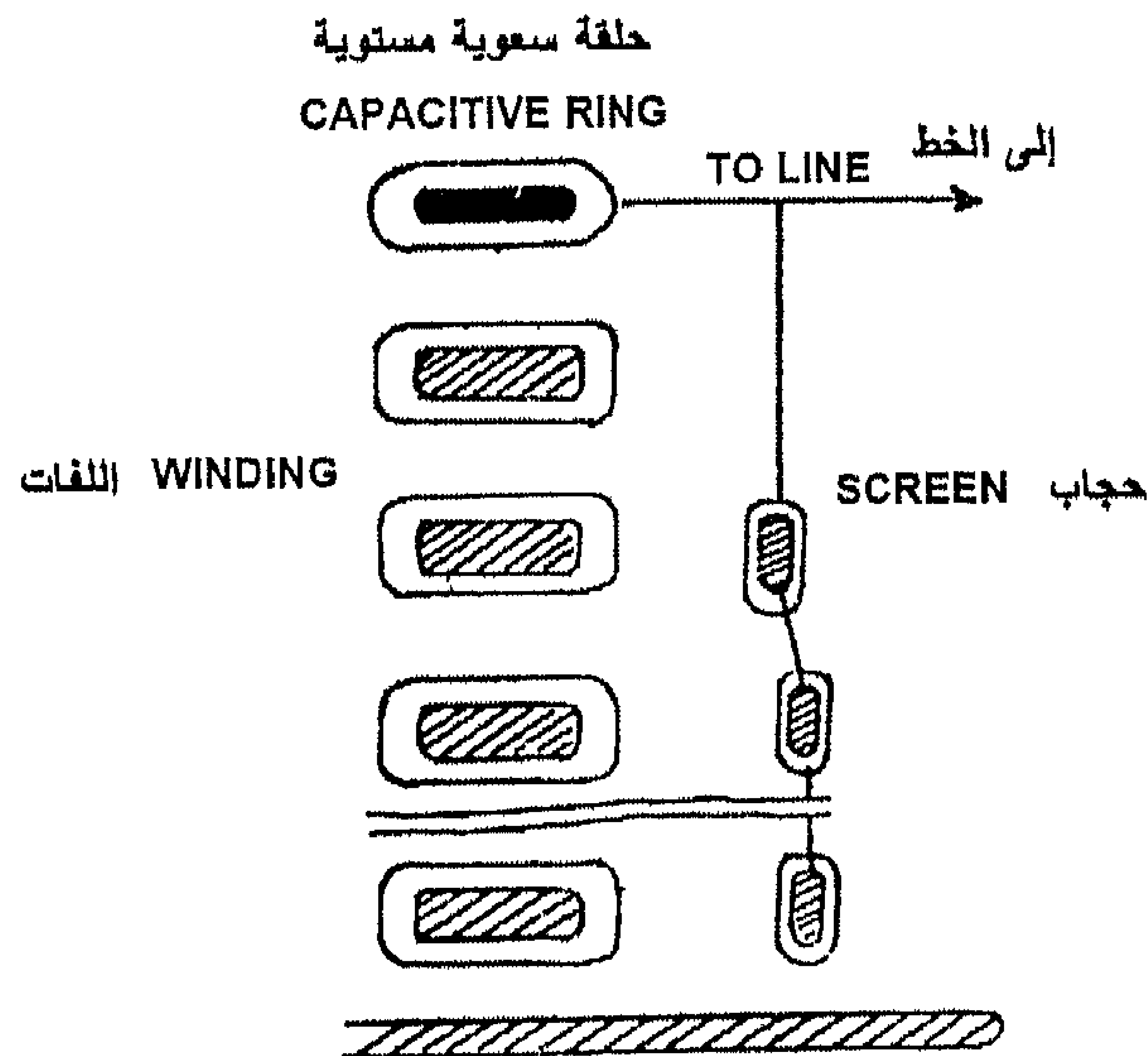
وهناك طريقتان أساسيتان لتساوي توزيع الجهد عبر اللفات، موضحتان في الشكل 9.9(a)، 9.9(b). في مخطط الشكل 9.9(a) تستخدم سعات إضافية C_e لتساوي توزيع الجهد بين النقط المنفردة للفة وبدايتها. ويمكن عمل هذا النظام – مثلاً– بمساعدة حجاب [ساتر] screen يحيط باللفات وموصل بطرف الجهد العالي. في مخطط الشكل 9.9(b) يتحقق تساوي توزيع الجهد بواسطة السعات الموصلة ΔK موازية للسعات الطولية للفات. ومن الممكن أن نوضح أنه لضمان توزيع منتظم للجهد عبر الشبكة السعوية، فإن C_e ، ΔK يجب أن تنخفض من بداية إلى نهاية اللفات طبقاً للعلاقة الآتية:



الشكل 9.9: المخططات الرئيسية لتساوي توزيع الجهد عبر لفات محول

$$\frac{C_e}{C} = \frac{l}{x} - 1$$

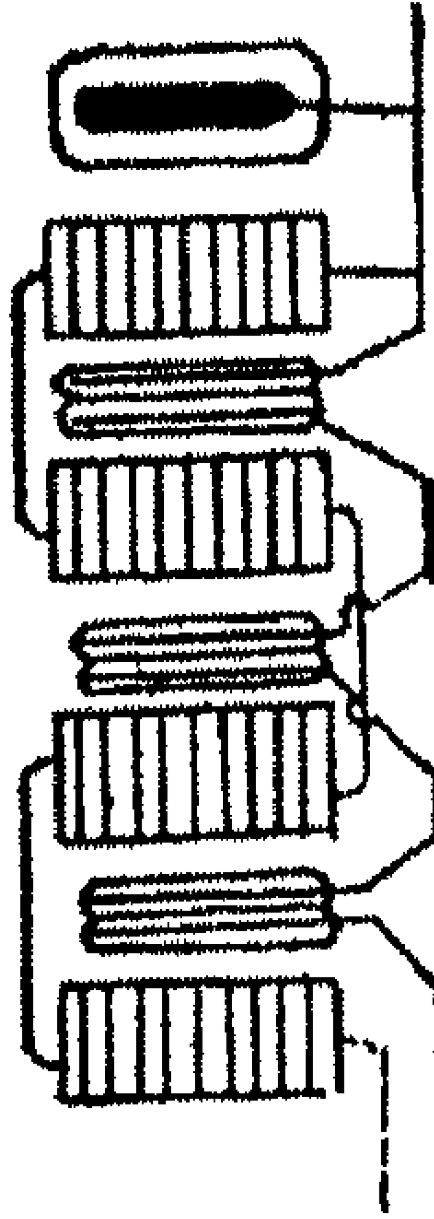
$$\frac{\Delta K}{C} = \frac{(l-x)^2}{2} \tag{1.9}$$



الشكل 9.10: التعويض الجزئي لمحول 154 kV

في المحولات الحديثة ذات الجهد الاسمي 110 kV وما فوقه تستخدم دائماً كل من وسيلتي تسوية توزيع الجهد. في المحول 110 kV تستخدم حلقات سعوية capacitive rings تسوي الجهد بين لفات الملف الأول. وفي محولات الجهود الأعلى –فإلى جانب ذلك– تستخدم حلقات حجب إضافية تسوي توزيع الجهد بين ملفات الجزء الابتدائي للفات [الشكل 9.10].

وطبقاً لاقتراح A.V. Panov صنعت شركة موسكو للصناعات الكهربية الثقيلة تركيب أحجبة إضافية مدفونة في لفات [الشكل 9.11] والتي تزيد من السعات الطولية وهكذا بشكل أصلي وضعت فكرة الطريقة الثانية لتنظيم الجهد موضع التنفيذ.

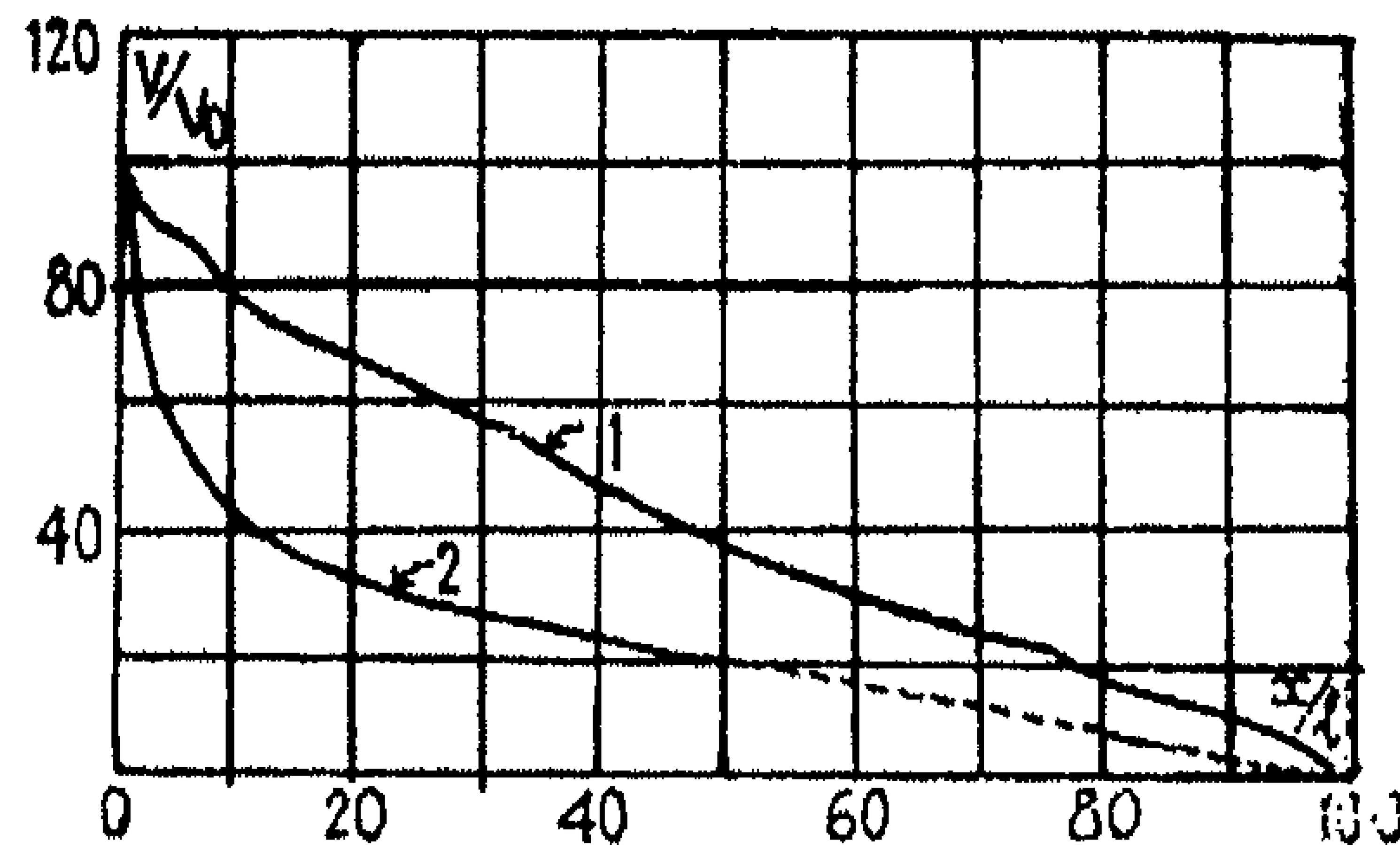


الشكل 9.11: مخطط الحماية الداخلية بواسطة مكثفات مدفونة داخل اللفات

ويمكن تحقيق زيادة السعات الطولية بالمثل باستخدام لفات اسطوانية متعددة الطبقات. ومع ذلك، فإن اللفات متعددة الطبقات تجعل التزود بالتبريد الفعال للفات بواسطة إمرار الزيت صعباً. لذلك، في المحولات الروسية تستخدم حتى 35 kV فقط.

كل طرق التنظيم المستخدمة لا تضمن التساوي الكامل لتوزيع الجهد ولكنها تخفض الجهود الزائدة على العزل الطولي كثيراً جداً وتُحد من سعة الذبذبات الطبيعية للفات.

وكمثال، في الشكل 9.12 مبين منحنيات توزيع الجهد الابتدائي في لفات محولين، أحدهما له حماية سعوية.

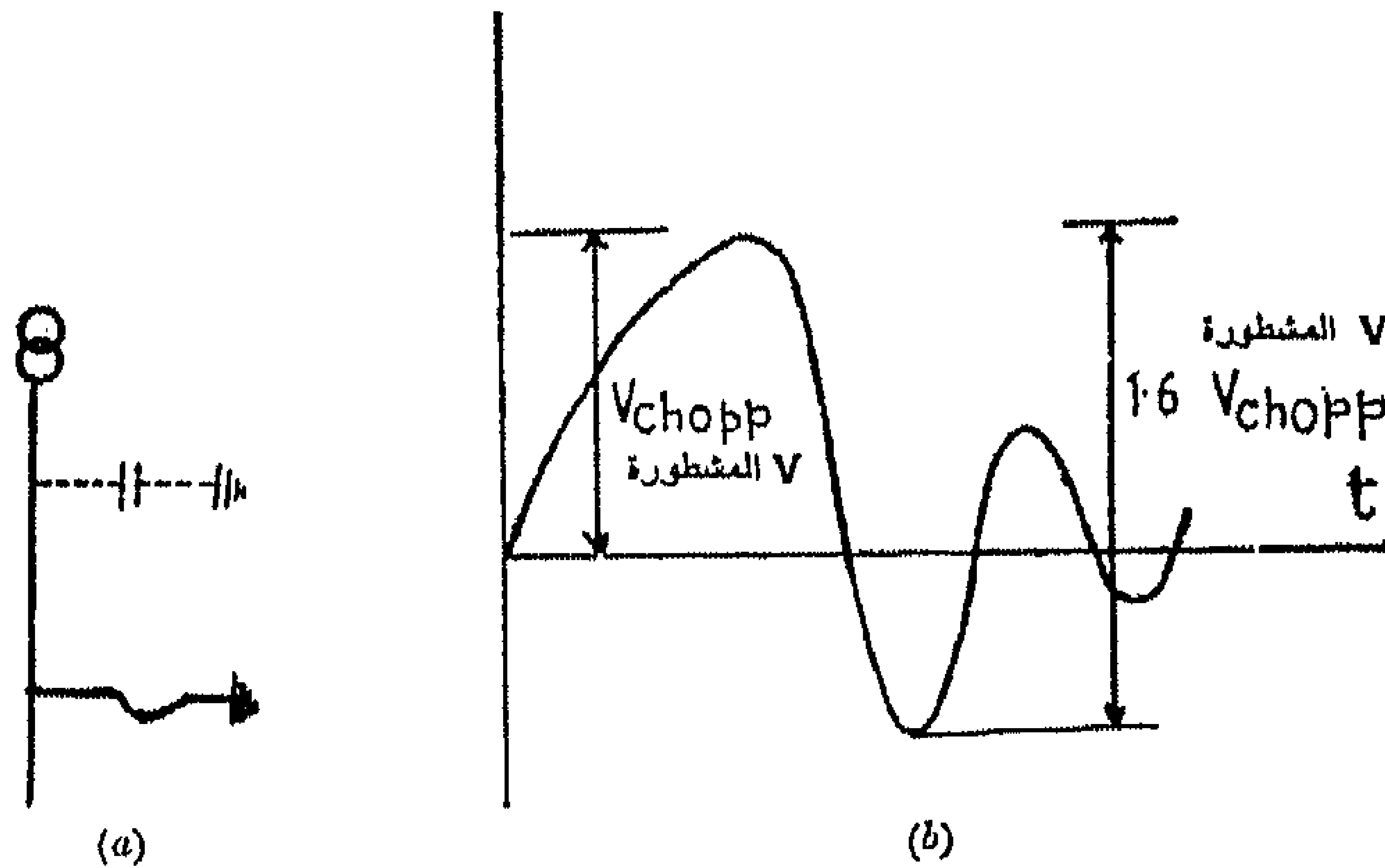


الشكل 9.12: توزيع الجهد الابتدائي في لفات محول. (1) المحول OMTT-29999/220 له حماية داخلية؛ (2) المحول OMTT-29999/220 بدون حماية داخلية

٩-١-٤ الخصائص الكهربية واختبار المحولات

Electrical Characteristics & Testing of Transformers

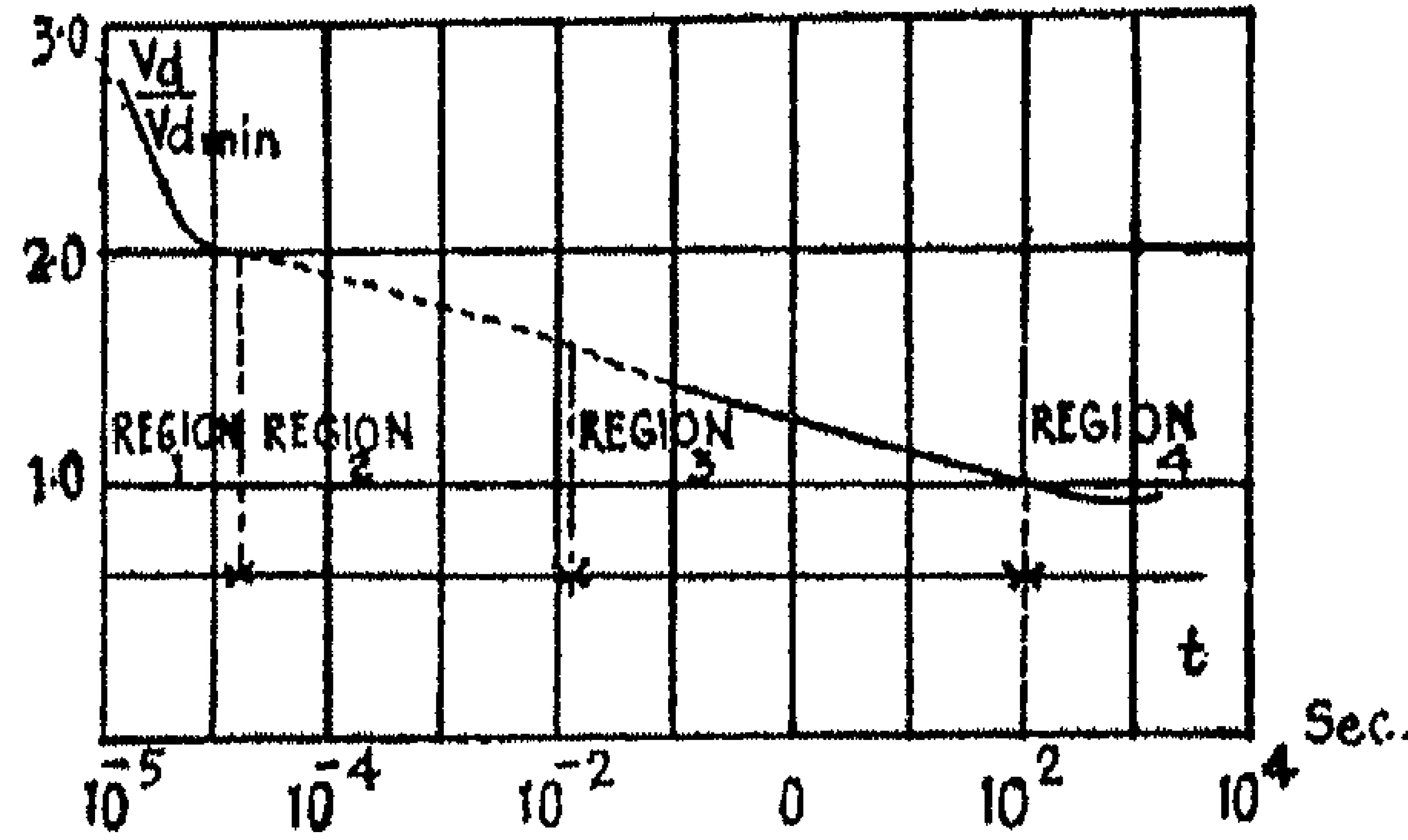
الموجات الدفعية ذات الطول المحدود، تمتلك معدل محدود لارتفاع الجهد على الواجهة المؤثرة على العزل. وحيث إن طول موجة قياسية هو 40 µs وفترة التوافقية الأولى للذبذبات الطبيعية تكون في حدود 50 µs وأكثر، فإن الذبذبات لا تتولد بالكامل في اللفات والجهود القصوى ستكون اقل قليلاً من تلك الخاصة بموجة غير متناهية الطول.



الشكل 9.13: تكوّن الموجة المشطورة عند أطراف محول

ويعتمد الجهد على العزل الطولي كثيراً على معدل ارتفاع الجهد، أي على طول الواجهة [الجبهة]. للأطوال الكبيرة للجبهة تسمح محاثات اللفات للتيار بالمرور في اتجاه لحظة الذروة – وهكذا– تسوي توزيع الجهد بشكل ملحوظ. ومع ذلك، فإن الجهود الزائدة الأكثر علواً على العزل الطولي تحدث ليس مع الموجات القياسية، ولكن مع الموجات المشطورة. ولذلك، فإن كل إجراءات حماية أي معدة من الجهود–الزائدة الجوية تُتخذ عند المحطات الفرعية substations، انهيار العزل في جوار المحول يكون ممكناً دائماً [الشكل 9.13(a)]. في هذه الحالة تؤثر موجة جهد مشطورة على المحول [الشكل النموذجي لها مبين في الشكل 9.13(b)]. وترتبط صفة تغير الجهد بعد الانهيار بعملية التذبذب في الكنتور المتكون من سعة المحول ومحاثات أسلاك التوصيل. كما هو واضح، فعند لحظة الشطر، يحدث تغير مفاجئ للجهد إلى قيمة تتعدى الجهد عند زمن الشطر بـ 1.6 مرة. وأظهرت القياسات أنه مع موجات مشطورة فإن الجهود الزائدة على العزل الطولي يمكن اعتبارها أكبر من تلك التي تحدث مع الموجات الكاملة. ولذلك، فإن اختبار المحولات بواسطة الموجات المشطورة يكون إجبارياً.

يبين الشكل 9.14 المنحنى المتوسط لاعتماد جهد التثقب لعزل حاجز–زيت على زمن التأثير. أثناء توقيع هذا المنحنى فإن جهد اختبار تردد القدرة المقابل لفترة دوام دقيقة واحدة يؤخذ كوحدة. وتختلف هذه المنحنيات قليلاً للتركيبات المختلفة من المحولات عن تلك المعطاة في الشكل 9.14 ولكن تبقى طبيعة التغير ثابتة.



الشكل 9.14: خصائص الفولت–ثانية لعزل حاجز–زيت عبر فترة زمنية كبيرة. المنطقة التي لم تُبحث مبينة بخط مشرط

ولأزمنة التأثير القصيرة لنبضة $(10^{-6}-10^{-5})$ sec. يحدث انهيار كهربي خالص، والقوانين التي تحكم هذا الانهيار تكون مماثلة لانهيار الغازات. في المنطقة الثالثة تكون العملية الكهروميكانيكية المرتبطة مع تكون القناطر الموصلة، والتي يأخذ توجيهها وإزاحتها وقت محدد ذات أهمية رئيسية. وفي المنطقة الرابعة المتميزة بتغير بطيء جداً في المتانة الكهربية، يحدث تدهور تدريجي للعزل المتصل بتأين فجوات الهواء الكيميائي، وتحلل الزيت وعمليات أخرى.

وكما نرى من الشكل 9.14، فإن نسبة النبضة لعزل المحول تكون أكبر من 2 إلى حد ما [هذه النسبة تقابل العلاقة بين جهد الاختبار الدفعي (النبضي) وجهد الاختبار عند تردد القدرة المعطى في الفصل الثامن] [انظر الجدولين 8.1، 8.2].

اختبار عزل المحول بواسطة جهد تردد قدرة ينفذ برفع الجهد تدريجياً من الصفر حتى قيمة تساوي جهد الاختبار وتتبع بتأثيرات لفترة دوام دقيقة واحدة. ويعتبر المحول قد صمد ضد الجهد إذا لم يحدث انهيار. ويمكن أن يختبر المحول بمساعدة مصدر منفصل للجهد وأيضاً باستعمال جهد مستحث في لفات الجهد العالي للمحول تحت الاختبار. وفي الحالة الأخيرة، من وجهة نظر حقيقة أن الجهد الذي يتعدى الجهد الاسمي بحوالي مرتين عليه أن يؤثر على

لفات الجهد المنخفض، ويسمح بالاختبار عند تردد متزايد في حدود 100 cycles . وبزيادة التردد والجهد إلى مرتين يبقى الحث في القلب بدون تغيير.

أثناء الاختبار النبضي لمحولات القدرة تنشأ صعوبات ضمان طول الموجة القياسي. ويتطلب الحصول على طول موجة قياسي سعة كبيرة غير عادية في مولدات الجهد النبضي. لذلك، يسمح أحياناً بالاختبار بموجات جهد ذات أطوال أصغر.

وهناك مشكلة أثناء الاختبار النبضي وهي كشف انهيار جزئي للعزل يمكن أن يكون بين اللفات أو بين الملفات. الطريقة الأكثر استخداماً لكشف الانهيار الجزئي للعزل هي استخدام الأوسليجراف للتيار في التعادل [طريقة تيار التعادل] ومقارنة الأوسليجراف المتحصل عليه بالأوسليجراف القياسي المأخوذ للمحول غير المدمر للنوع المعطى. دوائر القصر بين اللفات وبين الملفات تغير شكل الأوسليجرامات، ومن هذه الأوسليجرامات يكون ممكن غالباً إنشاء ليس فقط حقيقة إخفاق وتداعي العزل بل أيضاً تحديد مكانه. والأخير ذات أهمية كبيرة، حيث إن انهيار العزل يحدث على هيئة تثقب ليس كبير جداً في العزل ويمكن إيجاده بالفحص الظاهري بصعوبة كبيرة.

٩-٢ عزل الآلات الدوارة عالية الجهد Insulation of High Voltage Rotating Machines

٩-٢-١ مطالب العزل وتركيبه النموذجي

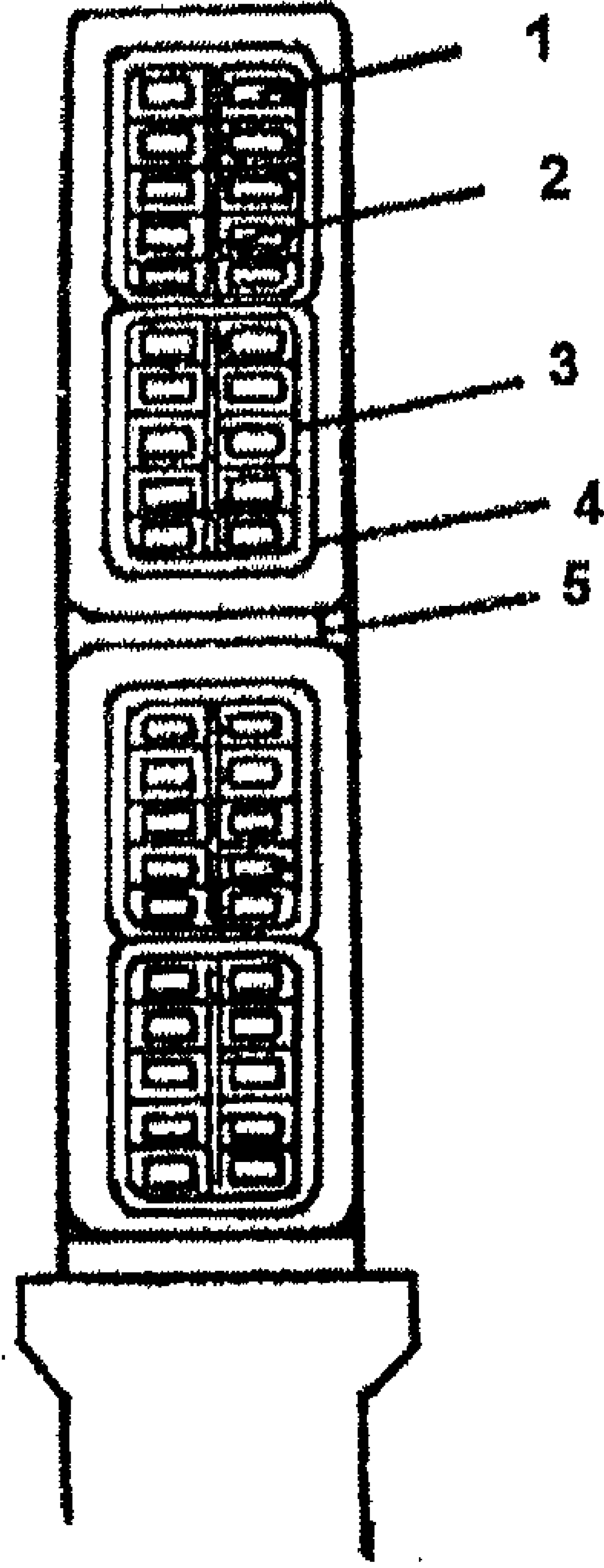
Requirements of the Insulation & Its Typical Construction

تتكون لفات كل طور لآلة دوارة من ملفات موصلة على التوالي وموضوعة في شقوق [مشقبيات] بأسلوب مماثل. عدد اللفات في كل ملف يعتمد على الجهد الاسمي وخرج قدرة الآلة وأيضاً على سرعة دوران عضوها الدوار its rotor. وفي الآلات ذات السعة الكبيرة تستخدم موصلات متوازية لتخفيض فقد التيار الدوامي. وعلى ذلك فإن عزل لفات العضو الساكن stator للآلات الدوارة يكون مقسماً إلى الأجزاء التالية [الشكل 9.15]:

١. عزل بين الموصلات المتوازية للفات.
٢. عزل بين لفات الملف.
٣. عزل بالنسبة للإطار.
٤. عزل بين جوانب الملف، أي بين جوانب اللفات المختلفة في نفس الشق [المشقبية].

حالياً تصنع المولدات والمحركات المتزامنة كبيرة السعة لـ kV (6.3–10.5)، مولدات السعة

الأكبر لها جهد حتى 18 kV . وعند تلك الجهود فإن ملفات المولدات التربينية يمكن أن تنفذ مفردة اللفة وبسببها يُمنع عزل اللفات. وعلى العكس فإن المولدات المهيدروكهربية والتي لها سرعة دوران أقل نسبياً تنفذ دائماً متعددة اللفات.

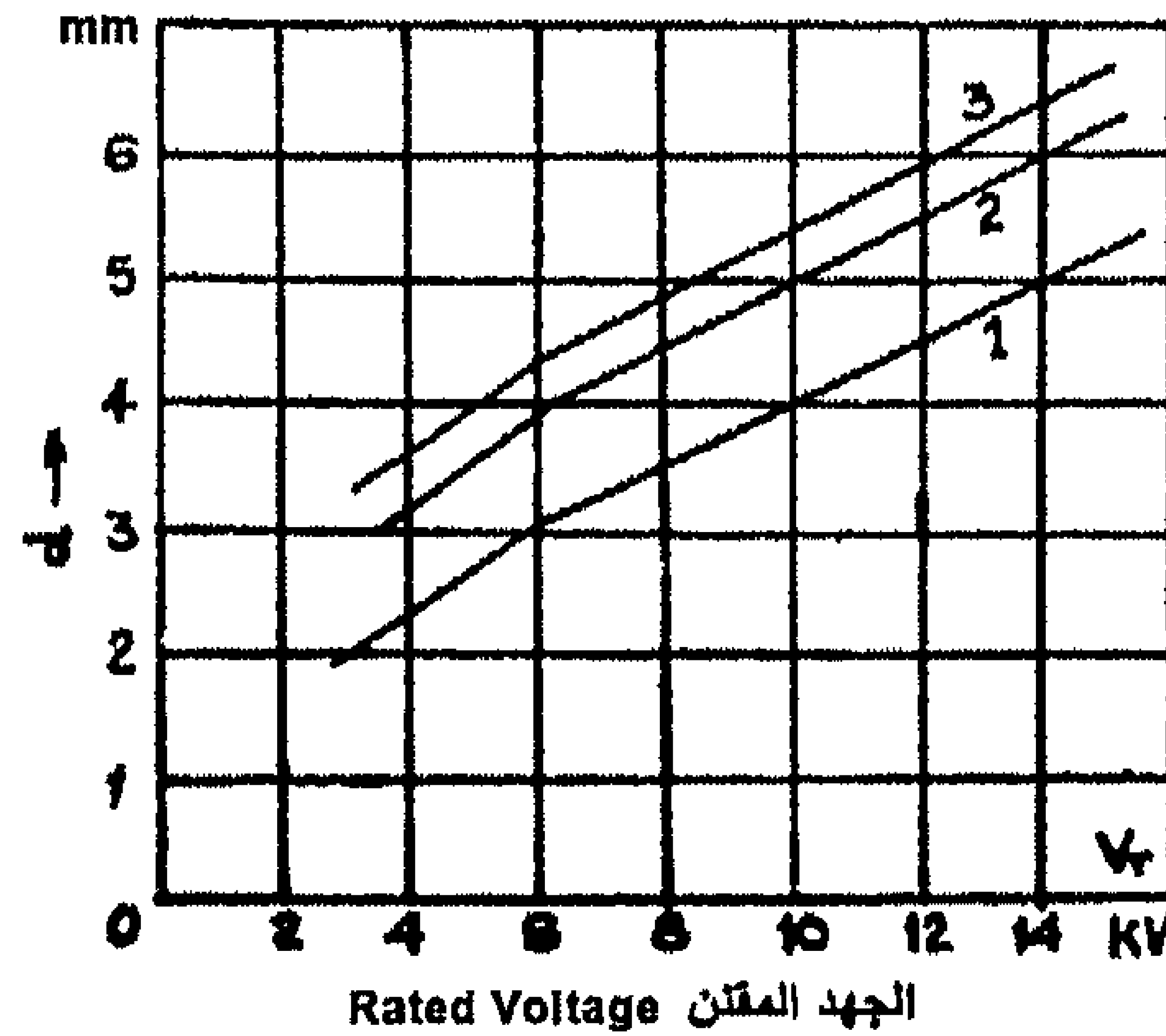


الشكل 9.15: عزل لفات العضو الساكن في شق. (1) نحاس؛ (2) العزل بين الموصلات؛ (3) عزل بين اللفات؛ (4) عزل بالنسبة للإطار [عزل رئيسي]؛ (5) عزل بين الطبقات

عزل الآلات الدوارة يتعرض باستمرار إلى ذبذبة وصدمات الأحمال الميكانيكية أثناء التشغيل –لذلك– يجب أن يمتلك متانة ميكانيكية عالية وكتلة ضخمة. شروط درجة الحرارة التي يعمل فيها العزل تكون ذات أهمية كبيرة. كثافات الحمل المستخدمة عادة في المواد الفعالة – تحت شروط التبريد المساهمة في التركيبات، تسبب درجات حرارة حتى 105°C في العزل. ودرجات الحرارة هذه تتطلب استخدام عزل من الفئة B [الفئة A تتطلب أقصى درجة حرارة تساوي 95°C والفئة B 105°C] ويجب أن يقاوم العزل أحمال ميكانيكية وكهربية أثناء عمره الكلي وعند زمن الصيانة الدورية للأعطال والعيوب التي تحدث أثناء الصيانة [(2–1) مرة/سنة]. ويُحدد عمر الآلة بواسطة التلف نتيجة الاستعمال العادي وأيضاً بواسطة التقادم في عمر العزل ويكون في حدود years (25–20). ومع ذلك، فإن سمك العزل يعتمد أساساً على الجهود الكهربية المؤثرة على العزل.

وطبقاً للاتجاهات الحديثة، فإن المادة النموذجية لإنشاء العزل الرئيسي هي عزل شريط الميكا المستمر. وشريط الميكا لا يكون مرناً جداً عندما يكون بارداً ولكنه يكون مرناً مرونة كافية عند درجات حرارة التشغيل وهو يتكون من طبقة واحدة من قشور الميكا ملتصقة بكلاً من جانبي ورقة رقيقة عالية الجودة. ويستخدم زيت البيتومين كمادة لاصقة، وعادة ما يستخدم شرائط عرضها mm (35–12) وسمكها حوالي mm (0.17–0.08). وتلف قضبان الملفات تماماً بشريط الميكا حتى السمك المطلوب من العزل، ويتم إنجاز هذا السمك في تطبيقات قليلة.

وبعد اللف الجزئي للعزل [ليس للسمك المطلوب] تخضع القطاعات للتجفيف والتشرب بمركب أسفلتي. وبعد ذلك، يتم لف إضافي للعزل والذي يجفف مرة ثانية ويتشرب. ويتم التجفيف الأول عند الضغط الجوي ثم تحت تفريغ. ويهدف التجفيف إلى إزالة الرطوبة والمخلفات الذائبة من المادة اللاصقة في الأنابيب الشعرية للورق وأيضاً للهواء من الورق والميكا. ومع ذلك، حتى عند تفريغ هواء عالي جداً فإن الإزالة الكاملة للرطوبة من الشَعْريات لا يمكن أن تتحقق، حيث يترك جزء منها على الجدران كرطوبة ممتصة. بعد التجفيف، يتم التشرب بمركب عند درجة حرارة في حدود 150°C وضغط في حدود (8–7) جوي. ومن خلال حقيقة أن المركب يمكن أن يخترق عمق محدود فقط، فإنه ينفذ عدة دورات قليلة من التجفيف والتشريب لآلات الجهد العالي، وتتم الدورة الأولى من التجفيف والتشريب بعد وضع عزل اللفات [أو بعد تجميع القضبان في لفائف لفة واحدة]. ويكون زمن هذه الدورة من hrs (13–11). وبعد ذلك تضغط قطاعات الأعمدة في مكابس خاصة.

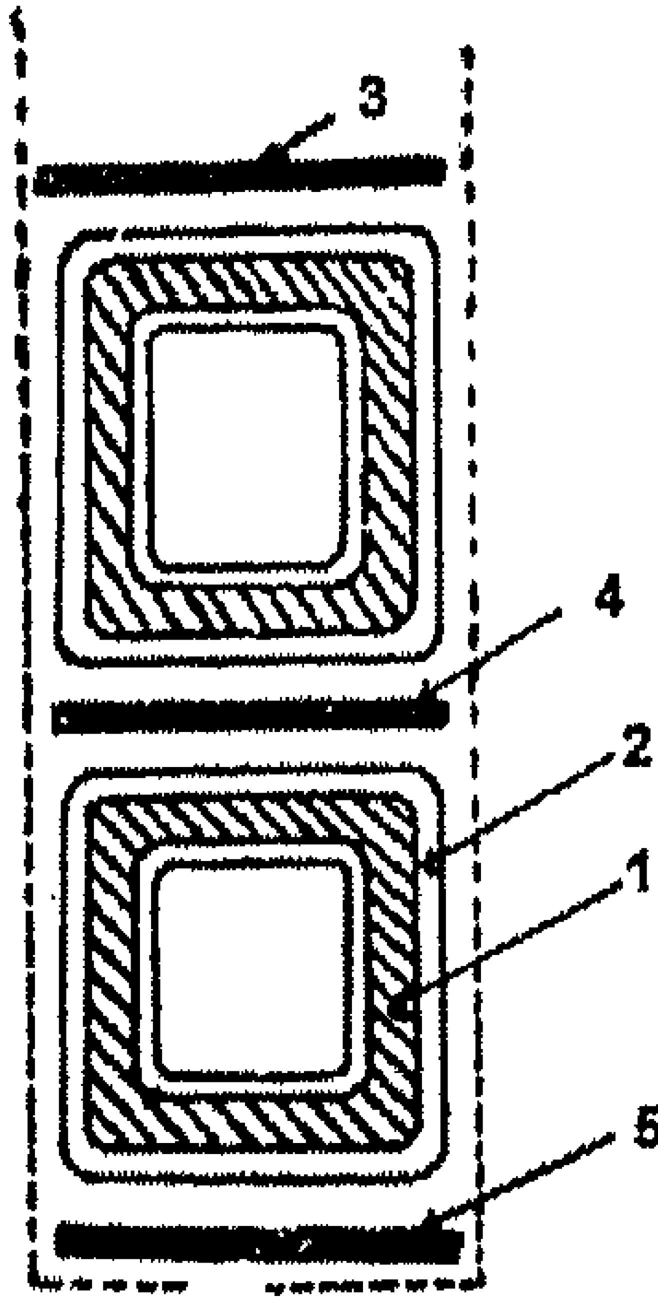


الشكل 9.16: سمك العزل الرئيسي عند جهود اسمية مختلفة. (1) لشريط ميكا في جزء الشق؛ (2) السمك الإجمالي في جزء الشق؛ (3) السمك الإجمالي في الجزء المتدلي

وتنفذ الدورات التالية من التجفيف والتشريب والتي يستغرق كل منها hrs (27–24) مرتان للآلات kV (10.5–3) ولثلاث مرات للآلات ذات الجهود الأعلى. ونتيجة لذلك، تتغلغل الكتلة المشربة في عمق طبقات شريط الميكا وتساعد في إنتاج عزل جيد.

منحنى تغير سمك العزل الرئيسي مع جهد اسمي للفات العضو الساكن stator لمولدات كبيرة هيدرو وتربو معطى في الشكل 9.16. أصغر سمك للعزل في الشقوق مقارنة مع ذلك المتدلي يُشرح بواسطة كثافة عالية للف العازل على الأجزاء المستقيمة والكبس الذي يتبعه.

ويلـف عـزل شـريط الميكـا علـى القمـة بواسـطة شـريط أسبستوس–حديد للحماية الميكانيكية وأيضاً لمنع تـدرج الجهـد بين جدار الشق وسطح القضبان المعزولة أو الملفات. وبـدلاً مـن ذلـك يمكـن اسـتخدام لـوح مـضغوط كهربيـاً أو شـريط زجـاجي مشرب بمادة سبه موصلة.



الشكل 9.17: تركيب العزل المستمر لشريط الميكـا في حالة ملفين في الشق

يوضح الشكل 9.17 تركيب عزل شريط الميكا في جزء الشق، ومواصـفات عناصـره المقابلـة للأرقـام الـتي في الـشكل معطـاة في الجدول 9.2. ويحتوي الجزء المتدلي دائماً علـى عـدد أقـل مـن طبقات الميكـا [واحـد أو اثـنين]، وبـسبب ذلـك يـنخفض سمـك العزل بـ 0.5 mm تقريباً. وهذا الخفـض يكـون ممكنـاً حيـث إن اللفات تكون مفصولة عـن حديـد العـضو الـساكن بواسـطة ثغـرة هوائيـة ونتيجـة لهـا يـؤثر جـزء فقـط مـن الجهـد علـى العـازل الصلب. وكما سنرى لاحقاً، يجب اتخاذ إجراءات خاصة لزيادة المتانة الكهربية عند تلك الأماكن التي تترك فيها اللفات الشق.

الجدول 9.2: البيانات المتعلقة بعزل الميكانيت للفات العضو الساكن

المكان في الشكل 9.17	اسم المادة	سمك المادة	سمك العزل على كلاً من الجانبين (mm) عند جهد (Volts)				
			3150	6300	10500	13800	15750
1	ميكانيت	0.13	4	6	8	9.5	10.5
2	شريط أسبستوس	0.5(0.3)	0.6	1.6	1.0	1.0	1.0
3، 5	ورق كرتون مشرب كما سبق	0.5–1.0	0.5–1.0	0.5–1.0	1.0	1.0	1.0
4		1–1.5	2.0	2.5	3	3.0	3.0

٩-٢-٢ الأنواع الحديثة من عزل المولد New Types of Generator Insulation

التخليق الناجح لمواد عازلة صناعية مختلفة دعـا إلى تطبـيقهم في الآلات الكهربيـة. أول تطبيـق ناجح للمواد المخلقة [الـصناعية] synthetics في الآلات الكهربيـة هـو خلـق عـزل لآلـة 11 kV [اليابان] من شريط زجاجي مشرب براتينج عـازل insulating resin. في هـذه الحالـة، تـستبدل

الميكا بشريط زجاجي والأسفلت براتينج عزل سائل يتصلب بإضافة البولي إيثير له. وكذلك عزل الآلة يستبدل بواسطة عدد من المواد العضوية. خواص العزل الكهربي للراتينجات المصلدة تكون كافية في الآلات حيث [$tan\,\delta < 10\%$ عند 100°C وتدرج التثقب 20 kV/mm تقريباً، أي نفس قيمة تركيبة الأسفلت–ميكا].

والحالة الثانية لتطبيق المواد الصناعية هو خلق عزل للآلات 6.6 kV، 3.3 kV من شريط زجاجي ومركب لاصق من الإسكابون escapon. والإسكابون هو ناتج المعاملة الحرارية للمطاط الصناعي. وهو يتحد جيداً مع الألياف الزجاجية ويعطي شريط لاصق. وبعد لف قطاع من اللفات، تحدث معاملات حرارية، يتحقق من خلالها ضخامة كتلة التركيب مع حفظ مرونة عالية. المحركات التي لها هذا العزل تعمل لمدة سنوات بدون تدمير. ويتم شرح ذلك بواسطة حقيقة أن العزل يصمد ضد الهزات والذبذبات الميكانيكية جيداً. وعيب هذا العزل هو عدم استقراره بسبب تأثيرات الكورونا.

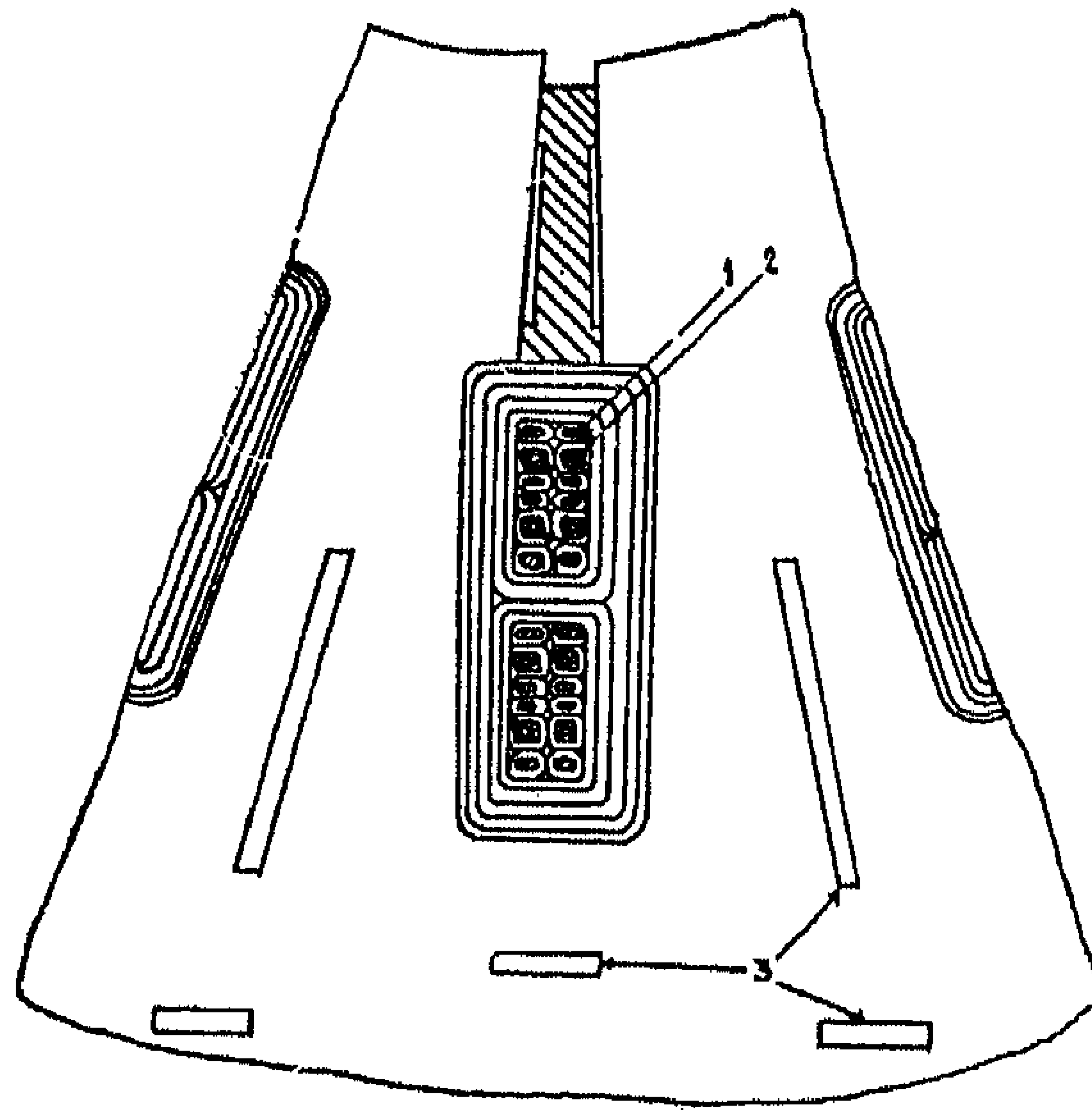
تركيب العزل من ورق الميكا وراتينج مفاعل–حرارياً يكون مثيراً. فبعد الترابط مع ورق الميكا، يوضع القطاع في كاميرا–حرارية مفرغة الهواء حيث يزال الهواء والرطوبة ويملأ التشرب براتينج مفاعل–حرارياً المسامات في العزل، وبعد ذلك يوضع القطاع في مكبس داخل فرن. يتحول الراتينج إلى مادة صلبة بدون تحرر أي منتج ثانوي مهما كان ويحصل القطاع على الأبعاد الصحيحة المقابلة لأبعاد الشق نتيجة للكبس. العزل من هذا الطراز له اسم تجاري هو thermo lactic.

آلات الجهد المنخفض يفترض أن تعزل براتينج مفاعل–حرارياً واحد فقط، ويحدث تصلبه بسرعة جداً عند درجة حرارة عالية [تصل إلى دقائق قليلة في بعض المركبات].

ويتميز عزل راتينج المفاعل–الحراري على عزل الميكا–أسفلت بأن معامل درجة حرارته للتمدد الخطي صغير لدرجة إهماله، لذلك فإن التشوه الحراري للعزل لا يحدث وهو الذي يسبب تشقق العزل العادي.

ويجب الإشارة لمواد صناعية أخرى لها خواص كهربية، حرارية، وميكانيكية عالية مطلوبة لعزل الآلات، ومنها راتينجات كريمني–العضوية Kremni-organic resins [المستخدمة مع ألياف الزجاج أو الميكانيت]. وبسبب تكلفتها المرتفعة وجدت عزل كريمني–العضوي تطبيقاً محدوداً، وبالأخص في المحركات التي تعمل عند ظروف خطيرة جداً [المناجم، المحطات، الجر، ...إلخ].

زيادة الجهد حتى 30 kV وما فوقه مع بقاء نفس العزل كما في مولدات الجهود المنخفضة تسبب في زيادة سمك عزل الآلة -وبالتالي- وزنها وكلفتها أيضاً. وبالنسبة لمولد خرجه كبير حوالي 33 kV نحتاج إلى حوالي 5 طن من الميكا عالية الجودة. إلى جانب ذلك، فإن الزيادة في سمك العزل يجعل تبديد الحرارة صعباً. لذلك ولأمان الموصلات والعزل من التسخين الزائد، فإن تحميل التيار النوعي يجب أن ينخفض وهذا يؤدي إلى الاستخدام المنخفض للنحاس. زيادة جهد المولد الاسمى يمكن أن يتحقق بتغيير طراز العزل أو بتطبيق أنظمة تبرد محسنة ومواد عزل جديدة.



الشكل 9.18: مقطع مستعرض في شق عضو ساكن لمولد 110 kV، 500 kW .
(1) موصلات مصمتة؛ (2) موصلات مجوفة؛ (3) قنوات تبريد الزيت

بدءاً من الثلاثينات تم تطوير عدد كبير من تركيبات المولدات عالية الجهد ولكنها لم تستخدم على نطاق واسع. وكمثال، يوضح الشكل 9.18 مقطع مستعرض لشق العضو الساكن لمولد 110 kV تم تطويره بواسطة AUPI. وقد تم عزل هذا المولد بواسطة شريط ميكا ولتحسين تبديد الحرارة استخدم تبريد الزيت. مع هذا الهدف، تم تصنيع جزء من الموصلات مجوفة [مفرغة] و-لذلك- تم خلق قنوات لتدوير الزيت.

استخدام سائل للتبريد مرتبط ببعض الصعوبات، حيث يتطلب موقع العضو الساكن في علبة محكمة الغلق ضد تسرب الزيت بدون منع المجال المغنطيسي في الثغرة. وبالرغم من هذه

الصعوبات، فإن استخدام زيت سائل ليس فقط للتبريد بل أيضاً لعزل المولدات يكون عالي التميز.

وحالياً تنفذ أعمال بحثية مكثفة في روسيا لتصميم وتنفيذ مولدات عند جهود 35 kV، 110 kV، 220 kV . وفيها يستخدم عزل الزيت–الورق أو عزل طراز المحول. والوحدات التجريبية من هذه المولدات قد تم إعدادها وتخضع للاختبارات. وفي كل الاحتمالات، فإن تلك المولدات عالية الجهد ستجد تطبيقاً واسعاً في المستقبل القريب.

٩-٢-٣ جهود الثقب لعزل آلة دوارة Puncture Voltages of the Insulation of Rotating Machines

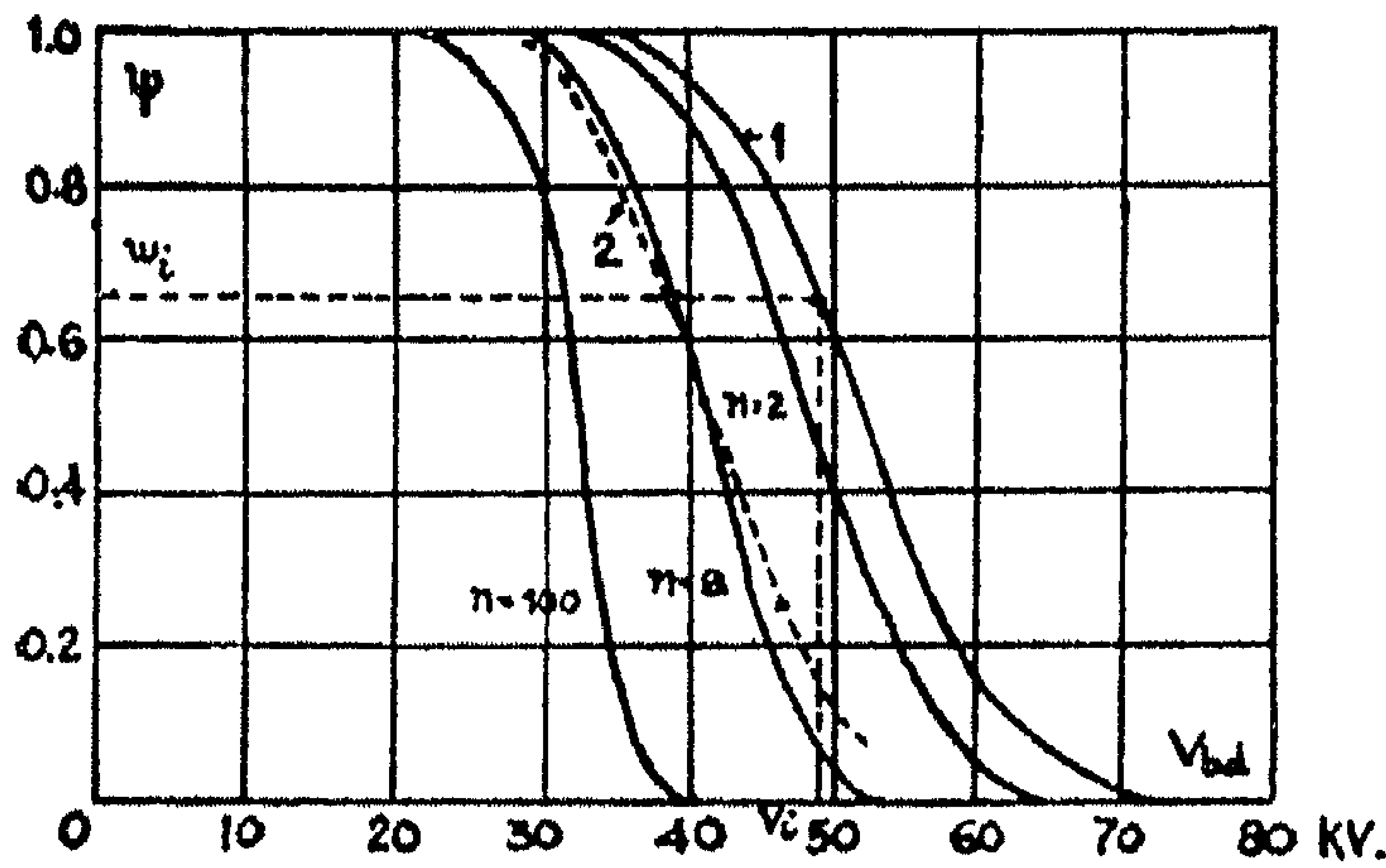
بالرغم من أن عزل الآلات الدوارة يعمل في نظام حراري خطير جداً، فإن انهيار العزل عند تردد القدرة لا يكون حرارياً ولكنه يكون مرتبطاً مع عملية التأين الناشئة في العزل. وفي نفس الوقت، فإن التسخين الزائد للفات الذي يحدث في التشغيل يمكن أن يسبب فشل كتلته الضخمة – وهكذا– ينخفض جهد الثقب.

وقد أظهرت التجارب أنه بالنسبة لعزل شريط الميكا يكون تفرق جهد الانهيار مميزاً. وهو يكون مرتبط مباشرة بتركيب شريط الميكا نفسه والذي يتكون من رقائق الميكا ذات السمك المختلف ومن التصمغ مع بطانة الورق ومع استحالة خلق عزل متجانس تماماً بمساعدة التكنولوجيا السائدة حالياً. لذلك، فإن القطاعات المنفصلة من أحد اللفات أو نفسها يمكن أن يكون لها جهود ثقب مختلفة.

قيمة جهود الانهيار لعزل آلة كهربية نحصل عليها من التجارب على قطاعات منفصلة من اللفات، مساحة عزلها تشكل كسر صغير من مساحة عزل الآلة ككل. إذا كان تفرق جهود الثقب ليس هناك، فإن مثل هذه التجارب ستعطي القيم المضبوطة لجهود الثقب للقطاع تحت الاختبار وأيضاً لكل اللفات.

وفي وجود تفرق محسوس لجهود الثقب، يكون غير مسموح باستخدام البيانات المتحصل عليها على قطعة اختبار صغيرة مباشرة على قطعة كبيرة.

دعنا نفحص عينة من عازل كهربي مساحته S_0. نفترض أننا لدينا كمية كافية من تلك العينات محدد لكل منهم جهد الثقب. وطبقاً لهذه البيانات، فمن الممكن إنشاء ما يسمى بـ"المنحنى المتكامل للتوزيع المحتمل لجهود الثقب" [الشكل 9.19، منحنى 1]. والذي يحدد إمكانية حقيقة أن جهد الثقب لعينة مختارة عشوائياً سيكون أكبر من القيمة الموضحة على المحور السيني.



الشكل 9.19: المنحنيات المتكاملة لتوزيع احتمالات جهود الثقب لعزل آلات دوارة. (1) منحنى تجريبي لقطعة اختبار مع إلكترود طوله 6 cm ؛ (2) منحنى تجريبي لقطعة اختبار مع إلكترود طوله 45 cm ($n = 7.5$)

وسنفحص الآن عينة أخرى لمساحة إلكترود $S = nS_0$ ، $n > 1$ وسوف نهدف لإيجاد المنحنى المتكامل لتوزيع هذه العينة بواسطة استعمال البيانات التجريبية المتحصل عليها على عينات صغيرة. ولهذا سنتصور أن العينة S تتكون من n من العينة S_0. ولكي تمتلك العينة S جهد ثقب أكبر من V_i من البديهي أن كل من العينات S_0 يمتلك أيضاً جهد ثقب أكبر من V_i. احتمال حقيقة أنه لعينة واحدة S_0 $V_{pun} > V_i$ يساوي ψ_{iso} وتحدد بواسطة المنحنى المتكامل للاحتمال في الشكل 9.19. احتمال أن كل العينات n سيكون لها جهد ثقب أكبر من V_i يكون مساوياً لحاصل ضرب الاحتمالات، أي أن:

$$\psi_{is} = (\psi_{iso})^n \tag{2.9}$$

وحيث إن $\psi_i < 1$ ، فإن هذه الصيغة تبين أنه بالنسبة للعينة الكبيرة فإن منحنى توزيع جهود الثقب يجب أن يكون تحت ذلك الخاص بعينة صغيرة. وهذا الاستنتاج واضح، حيث إن جهد الثقب لعينة يُحدد بالبقعة الأضعف في العزل. احتمال تواجد بقعة ضعيفة في العينة الكبيرة يكون أكبر كثيراً مما هو في العينة الصغيرة.

في الشكل 9.19 منحنيات التوزيع لكل من $n = 2, 8, 100$ أنشئت بمساعدة المعادلة (9.2). ويؤخذ المنحنى 1 كمنحنى البداية، ويكون قريباً جداً من المنحنى التجريبي المتحصل عليه على جزء من قطاع اللفات لمولد له طول إلكترود 6 cm، المنحنى الموضح بخط

مشرط في هذا الشكل حصلنا عليه بواسطة تجارب على عينة لها طول إلكترود 45 cm، أي أن $n = 7.5$. وكما نرى، فإن التجربة المباشرة تؤكد وجود جهد ثقب منخفض للعينة ذات المساحة الأكبر.

وليس من الصعب تحديد جهد الثقب المتوسط لعينة كبيرة بمساعدة المعادلة (3.2). وفي الحقيقة، يقابل هذا الجهد $\psi_i = 0.5$ –وبالتالي– فإن جهد الثقب المتوسط لعينات سيقابل جهد ثقب العينة S_0 مع احتمال يساوي:

$$\psi_{i\,S_0} = (0.5)^{\frac{1}{n}}$$

ويمكن إيجاد هذا الجهد من منحنى توزيع الاحتمالات في الشكل 9.19. فمثلاً، عند $n = 2$، $\psi_{i\,S_0} = 0.71$ فإن جهد الثقب المقابل $V_{Pun}^{n=2} = 47.5\text{ kV}$. وعند $n = 100$، $\psi_{i\,S_0} = 0.9864$ يكون جهد الثقب المقابل $V_{Pun}^{n=100} = 32.7\text{ kV}$. ومن المثال الأخير نرى أنه بالنسبة لـ n كبيرة جداً. يكون أساسياً أن نعرف بالضبط أن المنحنى الأصلي للتوزيع في منطقة ψ_i يكون أقرب للوحدة، أي المناطق ذات جهود الثقب الأقل. ولذلك يكون أساسياً إجراء عدد كبير من التجارب مع العينة S_0. وعلى هذا الأساس فإن المنحنى 1 يمكن أن يمثل على شكل دالة تحليلية analytical function. وبشكل خاص، فإن منحنى 1 في الشكل 9.19 يقابل ما يسمى "القانون العادي للتوزيع":

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_V^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}\,\sigma} e^{-\frac{(V - V_{av})^2}{2\sigma^2}} dV$$

حيث في الحالة المعطاة:

$$V_{av} = 52\text{ kV}$$

و

$$\sigma = 7.8\text{ kV}$$

ولعدد محدود من عينات الاختبار S_0 يستخدم جهاز رياضي أكثر تعقيداً يعتمد على نظرية المجموعة، ولكننا لن نتعامل مع هذه الحالة هنا.

جهود الثقب الدفعية لعزل آلة دوارة تختلف قليلاً جداً عن جهود ثقب تردد القدرة و–طبيعياً– لها اختلاف وتفرق كبير مماثل. وفي المتوسط، من الممكن اعتبار أن النسبة الدفعية للموجة القياسية لا تتعدى 1.2.

٩-٢-٤ طرق منع الكورونا في عزل الآلات الدوارة

Methods of Elimination of Corona in the Insulation of Rotating Machines

في الآلات ذات الجهد الاسمي الأعلى من 6 kV، يكون حدوث التفريغ العالي [الكورونا] corona ممكناً. إذا كان نظام التهوية مغلق، فإن وجود الكورونا يسبب تركيز قوي لأكاسيد النتروجين والتي تكوِّن أحماض في وجود الرطوبة مما يؤكسد العزل والأجزاء الداعمة له. بعض أنواع العزل، خاصة اللوح المضغوط–الكهربي، شريط القطن، تتعرض للفعل التدميري للكورونا. من وجهة نظر منع توابع الكورونا، يكون نظام التهوية المفتوحة أكثر تفضيلاً. وتم الحصول على نتائج جيدة باستبدال هواء التبريد بالهيدروجين، حيث تأثير الكورونا أقل خطراً على العزل، لأن غياب الأكسجين يمنع إمكانية تكون الأوزون وأكاسيد النتروجين.

الشدات العالية –التي تسبب ظهور الكورونا– يمكن أن تحدث في طبقات الهواء الضيقة بين العازل الكهربي الصلب وجدران الشق slot بسبب المنفذية الكهربية الصغيرة لعازل الهواء مقارنة مع تلك الخاصة بالميكانيت، وبالمثل في منطقة عدم الانتظام الكبير للمجال [منافذ التهوية، الأماكن التي تخرج منها الموصلات من الشقوق].

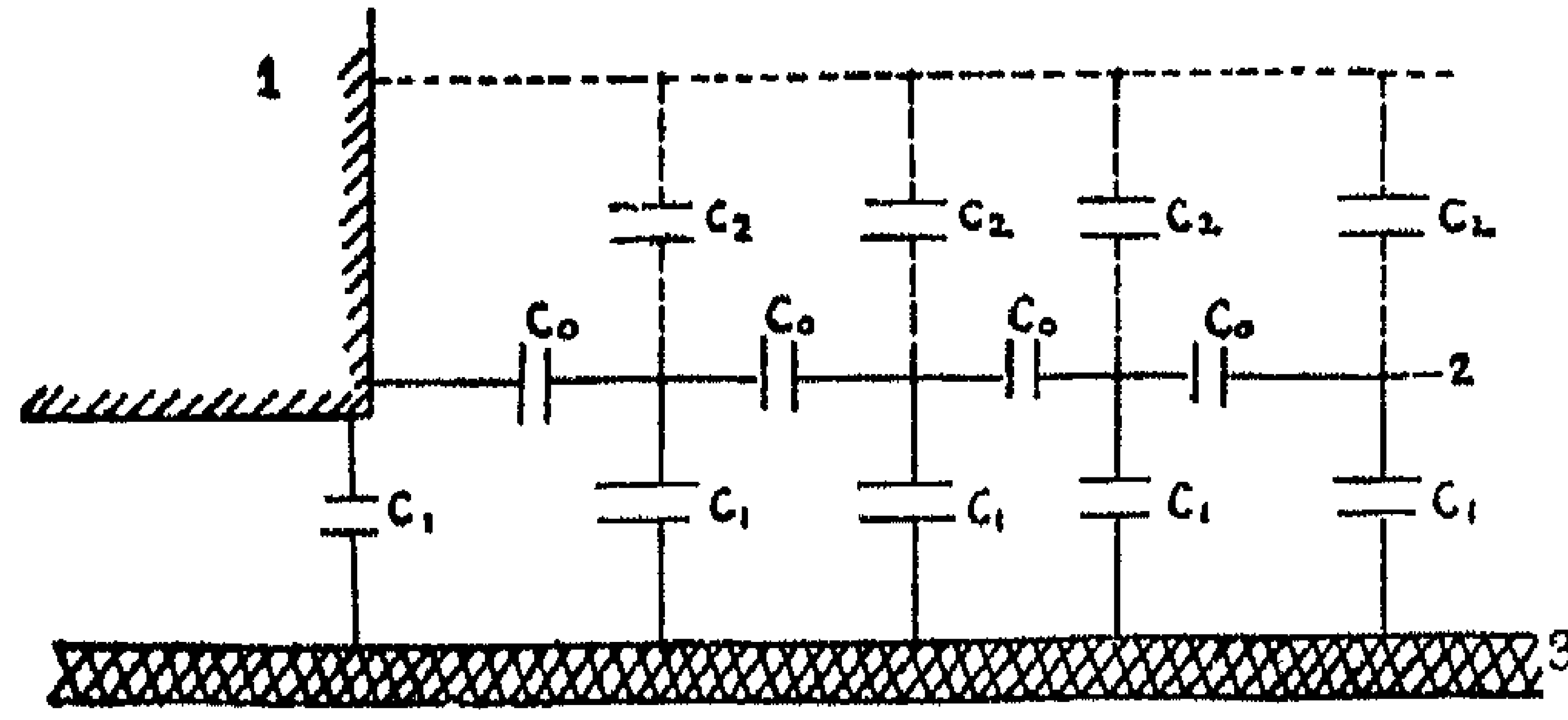
ويمكن منع الكورونا في جزء الشق باستخدام أغطية موصلة أو شبه موصلة والتي تأخذ جهد جدران الشق. في USSR يستخدم شريط أسبستوس حديدي لآلات 6.6 kV ويُمدد في جزء الشق لينتج حوالي 30 mm فوق حافة الشق. وبغض النظر عن منع الكورونا، فإن تمديد شريط الأسبستوس الحديدي يسوي المجال تحت قنوات التهوية –وهكذا– يحمل العازل الكهربي الصلب في الاتجاه الكهربي.

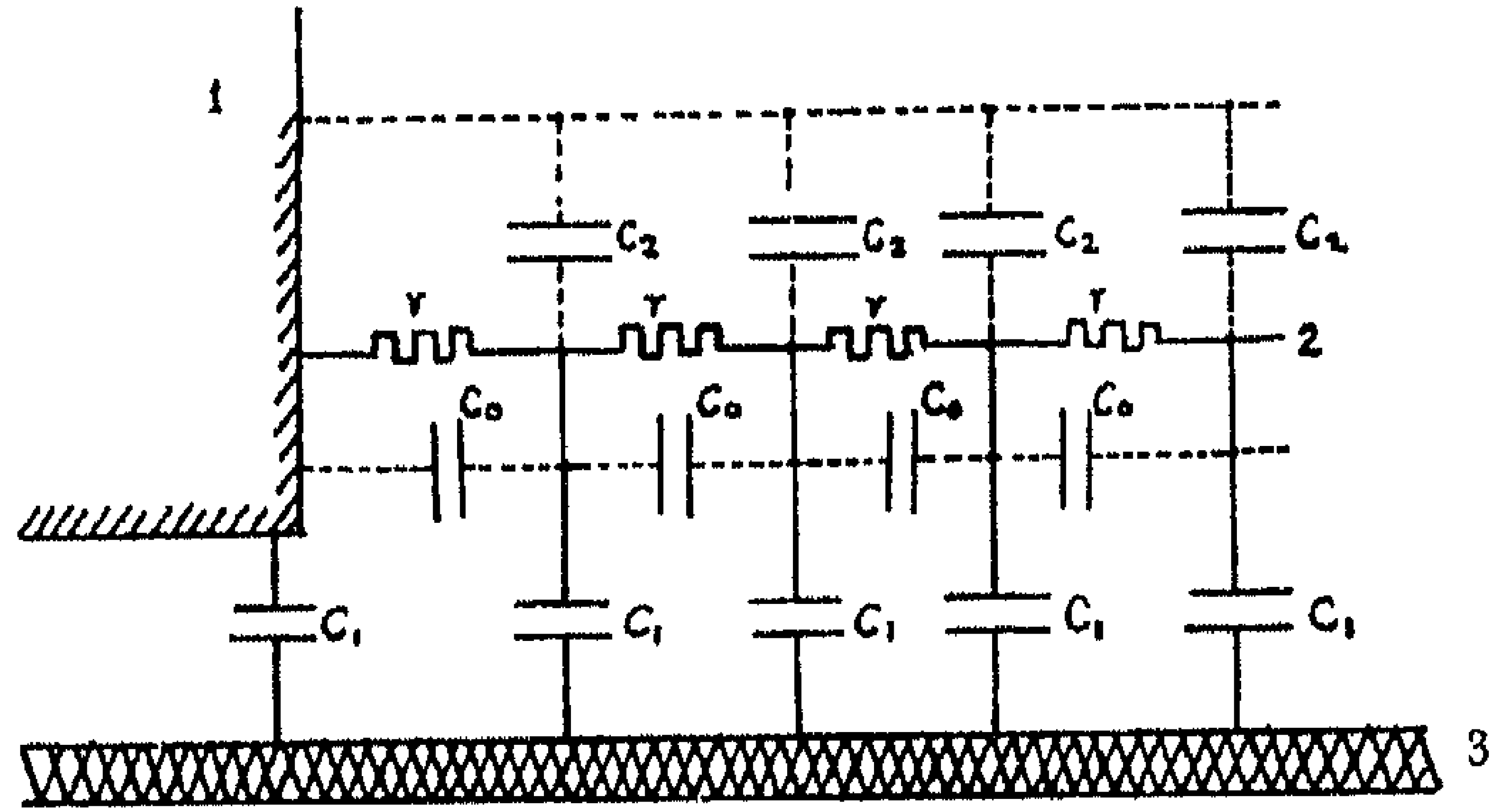
شدات كبيرة جداً –وبالتالي– إمكانية ظهور الكورونا تحدث عند مخرج الموصل من الشق. وهذه الشدات يمكن أن تنخفض إذا امتد الغطاء شبه الموصل خلف حدود الشق.

والآتي بعد شرح كيفي لتأثير التغطية الموصلة:

الدوائر المكافئة مع وبدون تغطية موصلة معطاة في الشكل 9.20. السعة C_2 تنخفض سريعاً متناسبة مع الحركة بعيداً عن جدران العضو الساكن ويمكن إهمالهم. وبهذا الأسلوب فإن الدائرة المكافئة بدون التغطية تختصر إلى شبكة سعوية بسيطة تتميز بتوزيع غير–منتظم عالي للجهد [الشكل 9.21، المنحنى 1].

في تواجد التغطيات الموصلة، فإن السعات الطولية توصل توازي بالمقاومة r إذا كان $r << 1/\omega C_0$، يمكن إهمال السعة C_0 ويمكن الحصول على شبكة مقاومة.





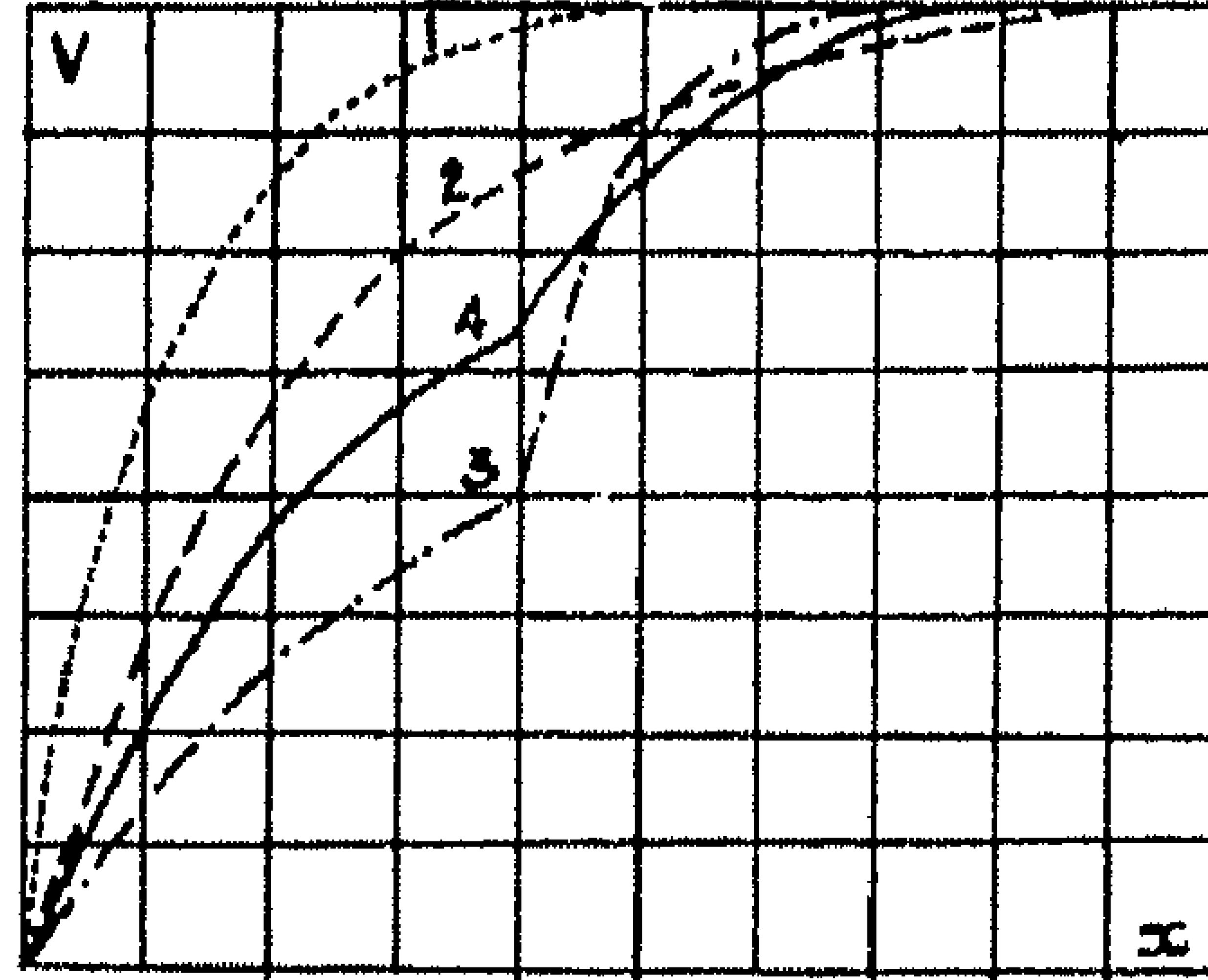
الشكل 9.20: الدائرة المكافئة للعزل في حالة خروج الموصل من الشق. (a) في غياب الغطاء الموصل؛ (b) في وجود الغطاء الموصل. (1) صلب العضو الساكن؛ (2) سطح العزل؛ (3) نحاس

طبيعة منحنى تغير الجهد تعتمد على حاصل الضرب $r\omega C_1$ [الشكل 9.21، منحنى 2]. وبتغيير المقاومة النوعية للغطاء فإن أقصى شدة عند مخرج موصل من الشق يمكن أن تنظم. إلى جانب ذلك، فإن طول محدد من الغطاء والذي يضمن هبوط جهد كافي عبره يجب أن يؤخذ، وإلا فإنه ستحدث شدات كبيرة عند حافة الغطاء [الشكل 9.21، منحنى 3] حيث فيما وراء حدود التغطية تتحول شبكة المقاومة السعة إلى شبكة سعوية. وباستخدام غطاء مصنوع من مرحلتين لهما مقاومات نوعية مختلفة، فمن الممكن الحصول على توزيع شدة مُرضي [الشكل 9.21، منحنى 4].

أثناء تحديد طول الغطاء شبه الموصل، من الضروري أن لا تتعدى شدة المجال الكهربي $20\ \mathrm{kV}_{r.m.s}/\mathrm{cm}$ عند جهد تشغيل الآلة.

ونحصل على غطاء موصل من طبقتين باستخدام لاكيهات زيت–سناج شبه موصلة لها مقاومات سطح مختلفة وتعد إضافة بعض كمية من السناج soot أو الجرافيت لورنيش التغطية

العادي. ويستخدم نوعان من الورنيش شبه الموصل. وحسب تقنية المصنع، فإن اللاكيه ذات مقاومة السطح الأعلى يسمى عادة "لاكيه الشق" والذي له مقاومة سطح أصغر يسمى "اللاكيه المتدلي" overhang laquer.



(a)

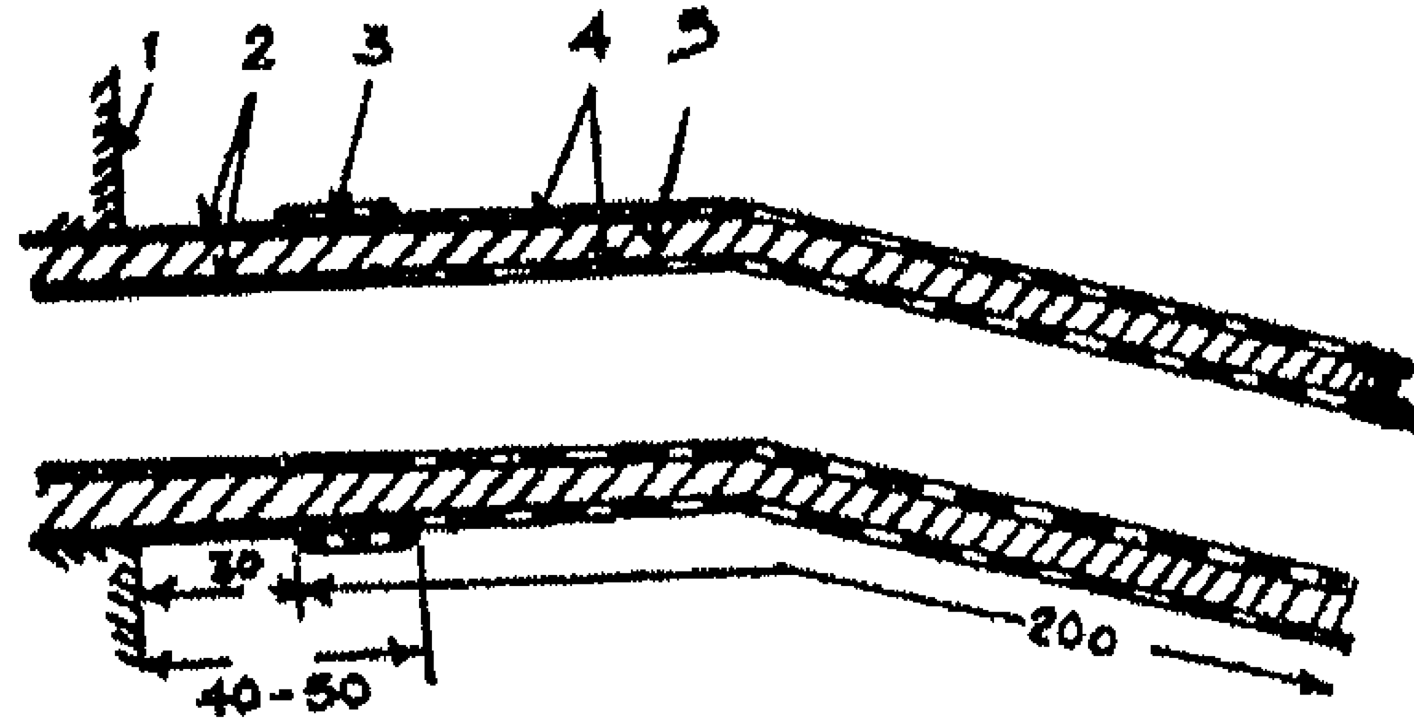


(b)

الشكل 9.21: طبيعة توزيع الجهود والميول عند حافة شق. (a) منحنيات الجهد عند سطح عازل موصل؛ (b) منحنيات الميول. (1) بدون غطاء؛ (2) غطاء شبه موصل له طول كبير؛ (3) غطاء شبه موصل له طول صغير؛ (4) غطاء من طبقتين

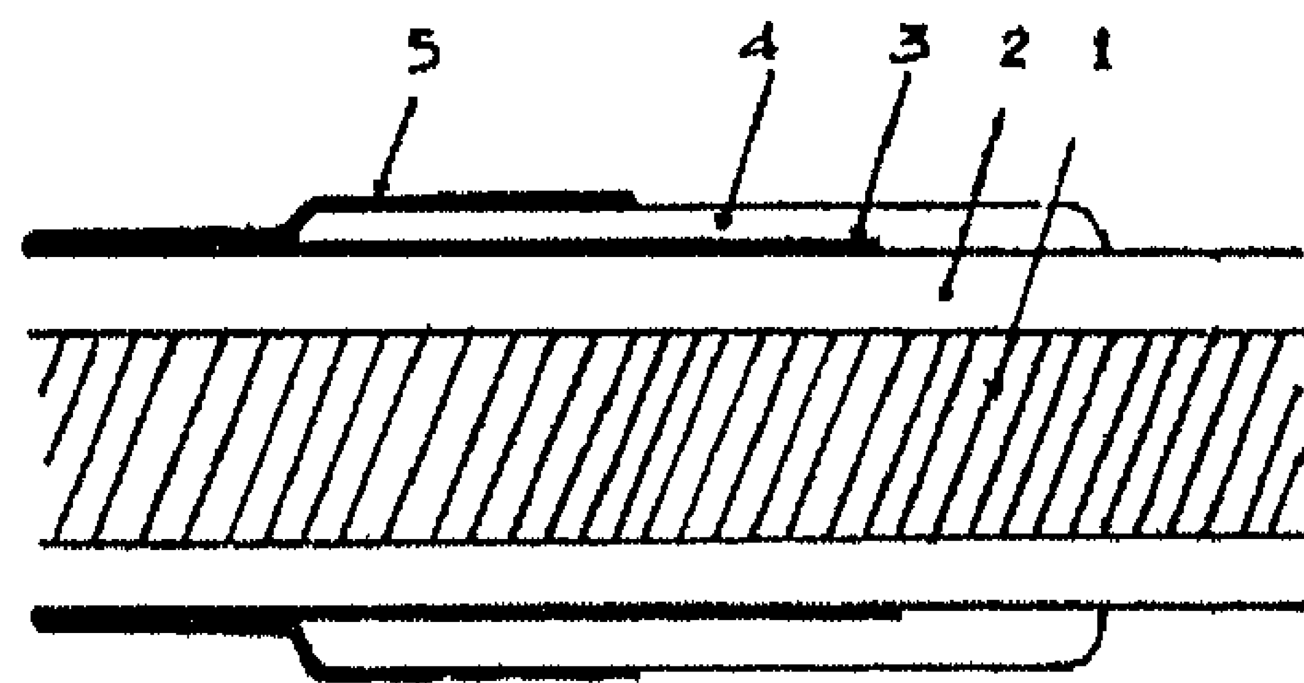
مخطط التغطية شبه الموصلة المستخدمة في الآلات المقننة حتى 100,000 kW معطاة في الشكل 9.22. الجزء المستقيم من اللفات يغطى بواسطة لاكيه شبه موصل الشق بحيث يبرز الغطاء mm (50–40) وراء حافة الشق. وبعد ذلك، تغطى الأركان التي يبلغ طولها حوالي 200 mm بواسطة لاكيه متدلي بحيث يتراكب مع لاكيه الشق بـ mm (20–10). وبعد ذلك يوضع شريط الأسبستوس الحديدي على طبقة لاكيه الشق وعلى طبقة اللاكيه المتدلي يوضع شريط تافيتا. وبعد ذلك، يغطى سطح شريط الأسبستوس بواسطة لاكيه الشق وسطح شريط

التافيتا [نوع من القماش] بواسطة لاكيه متدلي. مقاومة السطح لطبقة شبه موصل طولها 1 cm من الإلكترودات، المسافة بينها تساوي 1 cm، تؤخذ كـ $\Omega \left(10^5 - 10^4\right)$ للاكيه الشق على شريط الأسبستوس الحديدي، $\Omega \left(10^9 - 10^8\right)2$ بالنسبة للاكيه المتدلي على شريط التافيتا.



الشكل 9.22: نظام الغطاء شبه الموصل. (1) صلب العضو الساكن؛ (2) راتينج الشق؛ (3) شريط الأسبستوس الحديدي؛ (4) راتينج متدلي؛ (5) شريط تافيتا

تخفيض الشدة عند حافة الشق يمكن أيضاً الحصول عليها باستخدام الحاجب الداخلي شبه الموصل والتي تعمل بطريقة مماثلة للواجهة المتوسطة في جلب المكثف. وبتنظيم طول الحاجبات يمكن الحصول على تسوية ملحوظة للشدة عبر سطح العزل. توليفة من الحاجب الداخلي وغطاء شبه الموصل تعطي نتائج أفضل. ومع ذلك، فإن هذه الطريقة تكون مكلفة ومعقدة، لذلك لم تجد تطبيقاً في الآلات المنتجة في روسيا.



الشكل 9.23: تطبيق الغطاء شبه الموصل بالاتحاد مع حاجب واحد. (1) نحاس؛ (2) عزل؛ (3) حاجب شبه موصل؛ (4) عزل إضافي؛ (5) غطاء شبه موصل

ويوضح الشكل 9.23 طريقة أبسط في التطبيق ومقبولة عملياً وهي استخدام حاجب داخلي واحد، له جهد جدران الشق في اتحاد مع غطاء شبه-موصل. وجود الحاجب الداخلي يخفض الشدة عند حافة الغطاء. وتحدث شدات كبيرة عند نهاية الحاجب ولكنها ليست خطيرة من وجهة نظر إمكانية تدمير العزل ولا تشكل عبئاً على عزل الآلة الرئيسي.

٩-٢-٥ اختبارات المصنع لعزل الآلات الدوارة

Factory Testing of Insulation of Rotating Machines

أثناء عملية التصنيع وقبل تسليم الآلات من المصنع، يتعرض عزل لفات الآلة للاختبارات عند جهد متزايد. قيمة جهد الاختبار يجب أن تضمن الهوامش الضرورية لأمان المتانة الكهربية ويثبت على أساس القيمة المحتملة للجهود الزائدة مع اعتبار تدهور جودة العزل بسبب التقدم في العمر أثناء التشغيل.

وتقسم الاختبارات إلى اختبارات العزل الرئيسي، أي العزل بين الأجزاء الحاملة للتيار والهيكل، وعزل اللفات. ويتم اختبار العزل الرئيسي للفات الجهد العالي بجهد تردد قدرة وينفذ أربعة مرات في عملية الإنتاج:

١. قبل وضع العناصر المنفصلة [اللفات، أنصاف اللفات، القضبان] في الشقوق.
٢. بعد الوضع في الشقوق ولكن قبل توصيلهم معاً.
٣. بعد توصيلهم، لحامهم وتثبيت الأجزاء المنفصلة.
٤. قبل التسليم من المصنع وبعد اختبار ارتفاع درجة الحرارة عند درجة حرارة قريبة من درجة حرارة تشغيل الآلة.

فترة دوام تأثير جهد الاختبار تكون .sec (75–60). ويخفض مقدار جهد الاختبار بالتناسب مع تقدم الاختبارات، حيث يفترض أن متانة عزل اللفات يمكن أن تخفض تحت تأثير الإجهادات الميكانيكية والحرارية التي يتعرض لها العزل في عملية التمديد، اللحام، التثبت والعمليات التكنولوجية الأخرى وبالمثل بعد اختبار ارتفاع درجة الحرارة. ويعطي الجدول 9.3 قيم جهود الاختبار للفات العضو الساكن لآلات الجهد العالي.

اختبارات الأربعة طيات في عملية الإنتاج تضمن التعرف على العيوب واستبدال الأجزاء العاطلة والمدمرة من اللفات قبل التصنيع الكامل للآلة.

أثناء اختبار العزل الرئيسي، فإن عزل التعادل يتعرض لفعل جهد الاختبار الكامل. نظام الاختبار هذه يقابل شروط التشغيل، حيث في روسيا حالياً تعمل المولدات بتعادل منعزل أو مع تعادل مؤرض من خلال محاثة كبيرة [وحدة المولد محول]. وأثناء عطل طور مفرد مع الأرضي أو أثناء تأثير موجات الجهود الزائدة، فإن جهد التعادل يزداد و–في الحالات غير المحببة المنعزلة– يمكن أن يتعدى الجهد عند بداية اللفات. وبالتالي، يجب أن يكون للتعادل هامش أمان من المتانة لا يقل عن ذلك الذي عند طرف خط اللفات.

أثناء اختبار آلة عند مكان العزل يؤثر بجهد ليس أكبر من 85% من جهد اختبار المصنع على العزل.

الجدول 9.3: جهود الاختبار للعزل الرئيسي

رقم وخصائص الاختبار	الخرج (kVA)	الجهد $V_{r.m.s}$	جهد الاختبار $V_{r.m.s}$
١. قبل الوضع في الآلة	up to 10000	up to 11000	$2.75V_{nom}$ 4500
	above 10000	above 6000	$2.75V_{nom}$ 6500
٢. بعد التمديد وقبل الوصل	3–10000	upto 11000	$2.75V_{nom}$ 2500
	above 10000	above 6000	$2.50V_{nom}$ 4500
٣. بعد التوصيل	3–10000	upto 11000	$2.25V_{nom}$ 2000
	above 10000	above 6000	$2.26V_{nom}$ 4000
٤. قبل التسليم من المصنع	3–10000	upto 3000	$2.00V_{nom}$ 1000
		3000–6000	$2.50V_{nom}$
	above 10000	above 6000	$2.00V_{nom}$ 3000

اختبار عزل اللفات Testing of Turn Insulation

طبقا لـ GOST 133-41 يجب اختبار العزل بين اللفات المتجاورة لزمن قدرة 5 min بواسطة جهد تردد قدرة يتعدى الجهد الاسمي للفة بـ 30% . بالنسبة لآلات الخرج الكبير يكون هذا الجهد في حدود 1000 V . ومع ذلك أثناء الجهود الزائدة يمكن أن يكون فرق الجهود الحادث على لفة واحدة أكبر بعدة مرات من الجهد أثناء الاختبار طبقاً لـ GOST والتي تضمن متانة كافية لعزل اللفة عند الجهد الاسمي فقط.

موضح في الجدول 9.4 قيم جهود الاختبار على لفة واحدة للملفات الجاهزة بعد التشرب وقبل وضعهم في الشقوق كما هي مستخدمة في مصانع الآلات الكهربية.

اختبار الملفات المقطوعة بواسطة الجهد المتزايد لا يمثل أي صعوبة، حيث أثناء الاختبار فإن دائرة الملف تكون مفتوحة ولا يمر خلالها تيار. وأثناء اختبار عزل الملفات غير المقطوعة يكون التيار الناشئ من جهد الاختبار ومعاوقة الدائرة هو:

$$I = \frac{V_{test}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \cong \frac{V_{test}}{\omega L}$$

وهو ينتج في الدائرة.

الجدول 9.4: جهود الاختبار لأنواع قليلة من عزل اللفات

عزل اللفات لملف	جهد الاختبار $(KV_{r.m.s})$
موصل عاري معزول بطبقة واحدة من شريط الميكا الذي سمكه 0.13 mm وطبقة واحدة من شريط ورق القطن $\pi O Д$ أو $\pi Д A$ ، $\pi\sigma Д$	1000
موصل معزول خلال طوله بطبقة واحدة من شريط الميكا 0.13 mm وشريط ورق القطن	1500
نفس الموصلات السابقة معزولة بطبقتين من شريط الميكا سمك 0.13 mm وطبقة واحدة من شريط ورق القطن	2000

التأثير بجهد اختبار 50 cycles سيسبب تدفق تيار كبير بسبب المقاومة الصغيرة للفة، الملف أو القطاع. وللحد من التيار، يجب زيادة المفاعلة الحثية إلى أعشار قليلة من الأوم أو أجزاء من المائة من الأوم والتي يمكن أن تنفذ باستخدام جهد ذات تردد متزايد في حدود $(10^4 - 10^5)$ c/s. ولكي نتجنب إنتاج فقد عزل كهربي محسوس، يجب أن تُخمد ذبذبات التردد العالي، ويتعرض العزل لسلسلة من هذه الذبذبات المخمدة أثناء زمن 15 sec. ويمكن أن يتحقق الحد من التيار وفقد العزل الكهربي باستخدام جهد نبضي للاختبار.

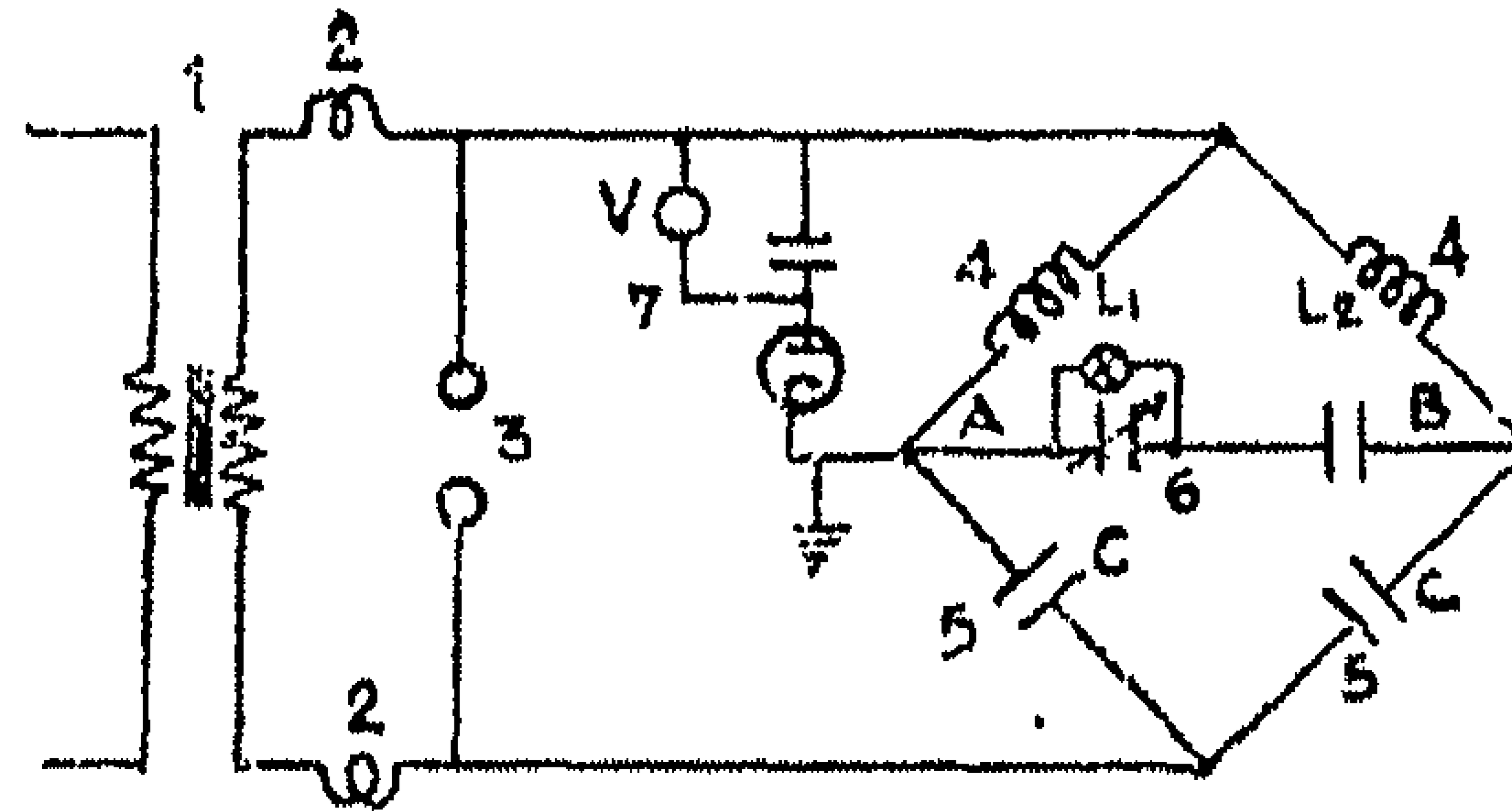
ويوجد عدد من الأنظمة لاختبار عزل اللفة. وهي تختلف عن بعضها أساساً في الطرق التي يكشف بها التغير في التردد أثناء ثقب عزل اللفة.

ويوضح الشكل 9.24 نظام أحد طرق كشف تدمير العزل بتغيير تردد الذبذبات الطبيعية.

قنطرة تتكون من مكثفان متماثلان [5] وملفان متماثلان تحت الاختبار [4] والقنطرة موصلة بأطراف محول رافع [1] من خلال ملفات خانقة [2] تستخدم للحد من التيار. وبالتوازي مع القنطرة موصل ثغرة [3] تومض كل نصف دورة عند لحظة مرور الجهد على السعة خلال الذروة. وهكذا، في كل فرع من القنطرة تنتج ذبذبات مخمدة عالية التردد تقاس سعتها بواسطة فولتامتر سعة. في حالة عدم التدمير، يكون كلا الفرعين لهما نفس الجهود عند النقط المناظرة، أي أن فرق الجهد بين النقط A ، B يساوي صفر. وإذا كان أحد الملفين مدمراً، يختل توازن

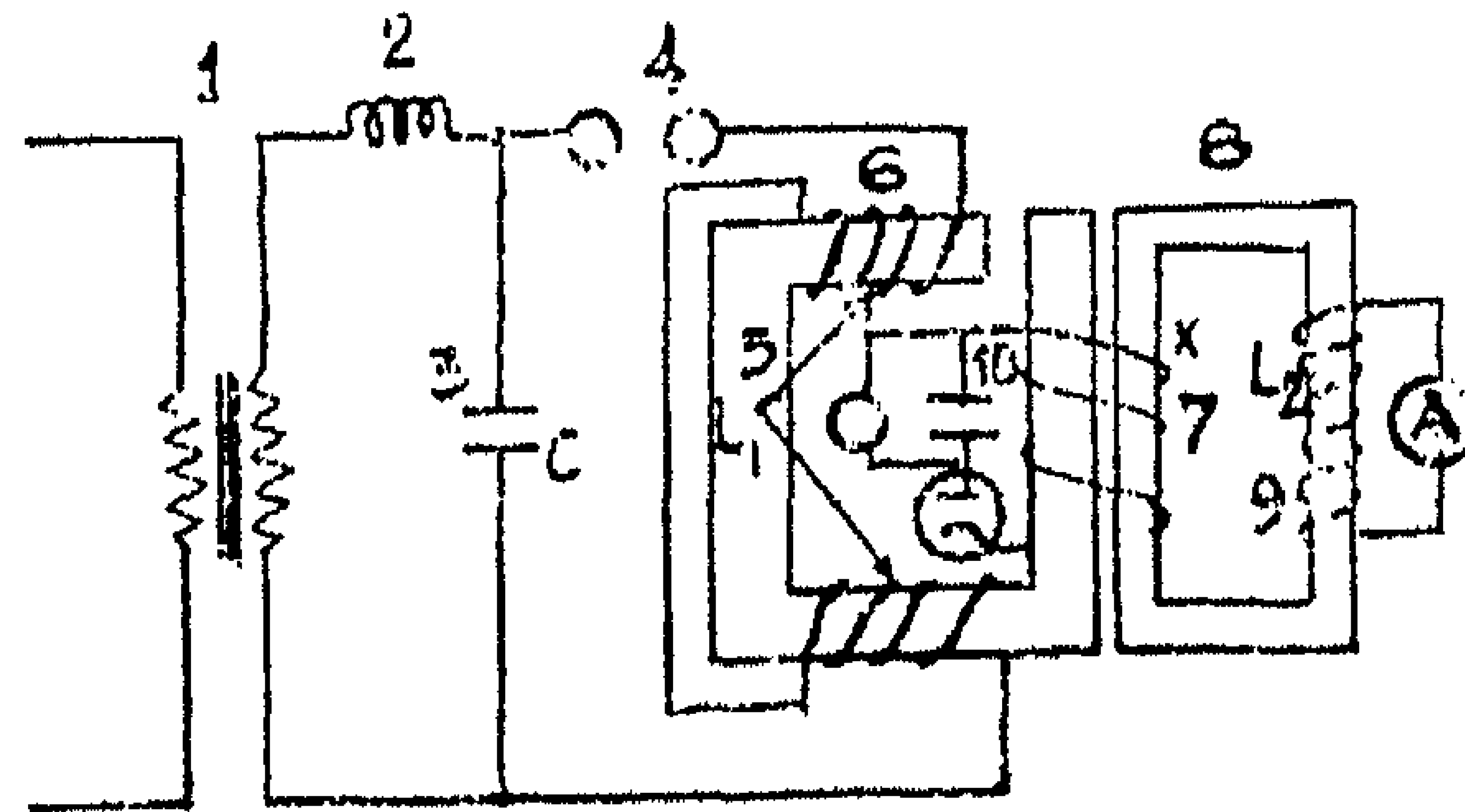
القنطرة. ويمكن اكتشاف ذلك بمساعدة لمبة النيون الموجودة في قطر القنطرة خلال مقسم الجهد السعوي.

مميزات هذا النظام هي بساطة تحديد العيوب والحساسية العالية. ◦



الشكل 9.24: مخطط لاختبار عزل اللفة بواسطة سلسلة من الذبذبات المخمدة عالية التردد.
(1) محول رافع؛ (2) ملفات مفاعلة لتحديد التيار؛ (3) ثغرة شرر؛ (4) الملفات تحت الاختبار؛ (5) مكثف؛ (6) مبين جهد مع لمبة نيون؛ (7) فولتاميتر سعة

ويمكن أيضاً كشف تدمير عزل اللفة بمساعدة جهود عالية التردد مستحثة في الملف تحت الاختبار باعتبار الحث الكهرومغنطيسي. ويكشف تثقب العزل بظهور التيار في ملفات دائرة القصر.



الشكل 9.25: مخطط لاختبار عزل اللفة بواسطة سلسلة من الذبذبات المخمدة عالية التردد. (1) محول رافع؛ (2) ملفات مفاعلة للحد من التيار؛ (3) مكثف التذبذب؛ (4) ثغرة شرر؛ (5) قلب مفتوح؛ (6) محاثة الكنتور المتذبذب؛ (7) الملف تحت الاختبار؛ (8) قلب إضافي؛ (9) ملف إضافي؛ (10) فولتاميتر السعة

العناصر الرئيسية للجهاز [الشكل 9.25] هي: دائرة التذبذب المخمد عالي التردد والقلب الصلب مفتوح الدائرة المركب عليه ملف التذبذب L_1 والملف أو القطاع تحت الاختبار X.

لفات الملف X تغلف القلب المساعد: والملف L_2 أيضاً ملفوف على هذا القلب المساعد وموصل بالأميتر الحراري A أو أي مبين آخر للجهد [لمبة فتيل أو تليفون]. الذبذبات المخمدة ذات التردد cycles $\left(10^4-10^5\right)$، الناتجة في الملف L_1 أثناء تفريغ المكثف، تستحث في القلب المفتوح الدائرة فيض مغناطيسي. هذا الفيض المغنطيسي، بالتالي يستحث في الملف تحت الاختبار جهد V_X والذي يكرر تقريباً شكل الجهد V_{L_1} في الملف L_1 أو بعبارة أخرى V_X يكون بسبب عملية التخميد عالي التردد وله سعة تتناسب مع V_{L_1} ونسبة عدد اللفات.

$$V_X = V_L \frac{n_X}{n_{L_1}}$$

إذا كان عزل الملف X غير مدمر، لا يوجد عملياً أي تيار يسري فيه [الملف مفتوح]. أي تدمير للعزل أثناء الاختبار بواسطة جهد متزايد يسبب ظهور تيار في اللفات المقصرة. وهذا التيار يستحث فيض مغناطيسي في القلب الإضافي [8] والذي يستحث جهد في الملف L_2. الجهد المستحث في الملف L_2 يمكن اكتشافه بمساعدة مبين. ويمكن أن تطبق الطريقة المعطاة هنا لاختبار العزل بين اللفات حتى وقت تمديد عنصر اللفات في شقوق العضو الساكن.

٩-٣ عزل كابلات القدرة عالية الجهد — Insulation of High Voltage Power Cables

٩-٣-١ معلومات عامة — General Information

الموصلات المرنة المعزولة المزودة بغلاف واقي يحمي العزل عن مختلف أنواع العوامل الخارجية، تسمى "كابلات" cables. موصلات [قلوب] كابلات القدرة تصنع عادة من نحاس رفيع مجدول منفصل أو موصلات ألومنيوم تعطي القلب المرونة الأساسية والمتانة الميكانيكية. واعتماداً على الجهد الاسمي والغرض تصنع كابلات القدرة من قلب مفرد أو ثلاثة قلوب. كابلات الثلاثة قلوب –عادة– تكون أكثر ملائمة للاستخدام في الأنظمة ثلاثية الطور، ولكن كما سنعرف لاحقاً، فإن لها عدد من العيوب التي تجعل من تصنيعها عند جهود عالية صعباً.

عزل الكابل يجب أن يمتلك متانة كهربية عالية تسمح بتخفيض قطره وتكلفته –وبالمثل– يجب أن تكون مرنة ويجب أن تحفظ متانتها الميكانيكية عبر مدى واسع من تغيرات درجة الحرارة. في كابلات القدرة يستخدم عزل الورق–الزيت من طرازات مختلفة، والذي يختلف من نوع لآخر بواسطة كمية الزيت المشرب لكل وحدة حجوم من العزل وبواسطة لزوجة الزيت. وبالنسبة لتشريب الورق في كابلات القدرة وبخلاف الزيت المعدني مع الإضافات المختلفة فإن

الراتينج resin ذات أهمية رئيسية في الاستخدام. إضافات الزيت -أولاً- تمنع تأكسده الذي يؤدي إلى تدهور عمره وخواصه العازلة، ثانياً تتحسن لزوجة الزيت في غياب الإضافات.

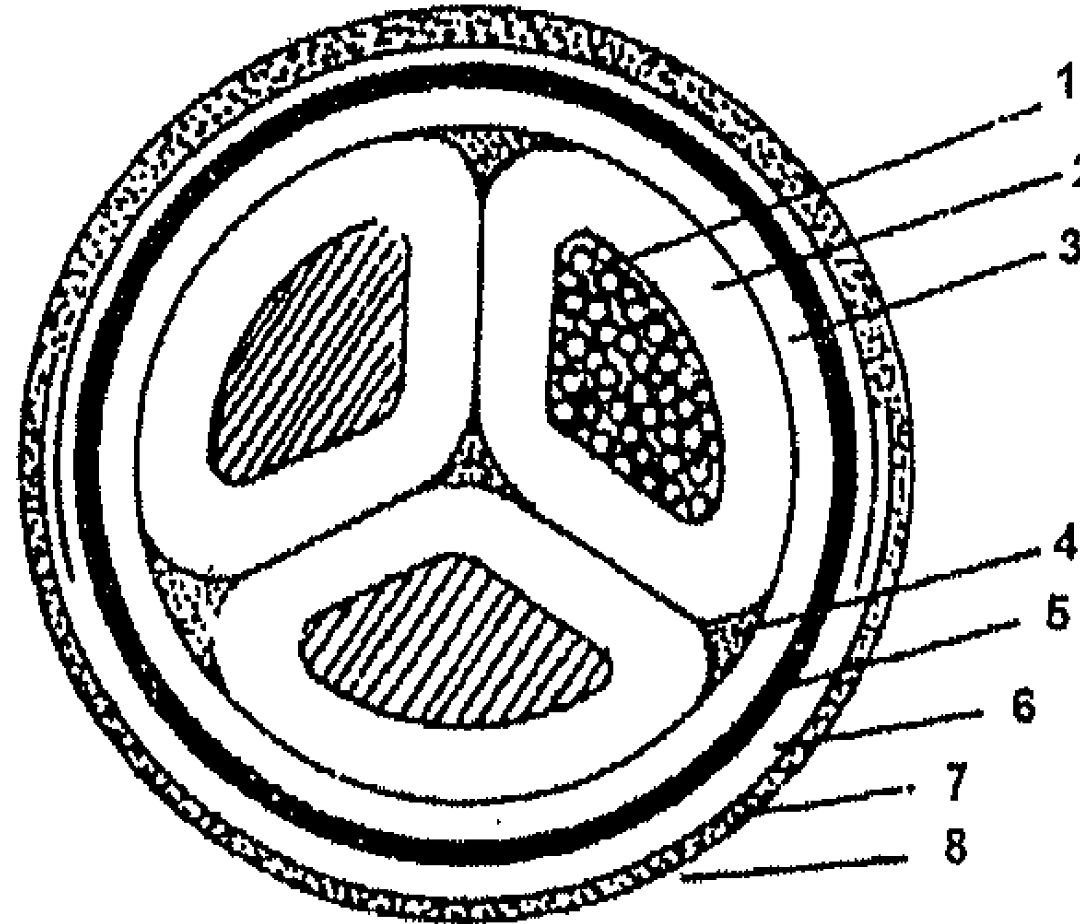
تمتلك الكابلات ذات التشرب اللزج مميزات أثناء التمديد والتشغيل. أثناء توصيل قطع الكابل المنفصلة بمساعدة قارنات توصيل، لا يتدفق زيت التشريب إلى الخارج من أطراف الكابل. وهذا يساعد على تجنب تكون فجوات الهواء في عزل الكابل بمساعدة إجراءات بسيطة. العيب الرئيسي لكابلات التشرب اللزج هو إمكانية ظهور فراغات غازية في التشغيل، إذا كان الكابل مشغلاً في نظام متغير للحمل الكهربي الذي يسبب تناوب التسخين والتبريد في الكابل. حيث إن معامل درجة الحرارة لتمدد عزل الكابل يكون أكبر من ذلك الخاص بالغلاف [يصنع عادة من الرصاص في كابلات القدرة]، فمع تسخين الكابل في نظام الحمل الأقصى، فإن الغلاف يجبر على أن يفتح بواسطة العزل. ومع انخفاض الحمل وبالتالي تبريد الكابل، يسترد الغلاف تشوهه المتخلف. ونتيجة لذلك يتكون عدد من الفراغات داخل الكابل تملأ تدريجياً بغاز صادر من العزل. وعادة تتكون الفجوات الغازية في جدار الغلاف -ومع ذلك- وباعتبار انتشار الغاز خلال العازل، تتكون الفجوات الغازية قريباً من القلب أيضاً -أي- في منطقة أقصى شدة للمجال الكهربي. وكما هو موضح لاحقاً، فإن الفجوات الغازية في الكابلات التي تعمل عند جهد متردد، هي السبب في التثقب السابق لأوانه للعزل. ولمنع ذلك، فإن شدة المجال العامل يجب أن تخفض، أي أن سمك عزل الكابل يجب أن يزداد، وبالتالي تزداد تكلفته. ولذلك، فإن الكابلات ذات التشرب اللزج [طراز الكابلات حتى 35 kV a.c.] تكون أقل تفضيلاً عند جهد متردد عالي جداً عندما تكون مشكلة الشدة العاملة في العزل ذات أهمية كبيرة.

حالياً عزل ورق الكابلات المشرب مع الزيت السائل عند ضغط جوي قليل مستخدم أساساً في كابلات الضغط العالي. تكون الفجوات التي يمكن أن تتواجد لفترة زمنية محسوسة لا يكون ممكناً في هذا النوع من العزل، حيث إنها تملأ في الحال بزيت سائل قابل للتدفق عبر الكابل. وبهذه الطريقة، فإن العيب الرئيسي للكابل المزود بتشرب لزج يمنع، ورغم ذلك عند تكلفة ذات تعقيد في التركيب. وهناك أنواع أخرى لكابلات الجهد العالي، سنناقش بعضها باختصار لاحقاً.

٩-٣-٢ كابلات التشرب اللزج Cables with Viscous Impregnation

موضح في الشكل 9.26 قطاع مستعرض لكابل ثلاث قلوب خاص بـ 6 kV . وكما نرى في الشكل، فإن القلوب ليست على شكل دائري بل شكل قطاعي لكي نضمن عزل أفضل نسبياً

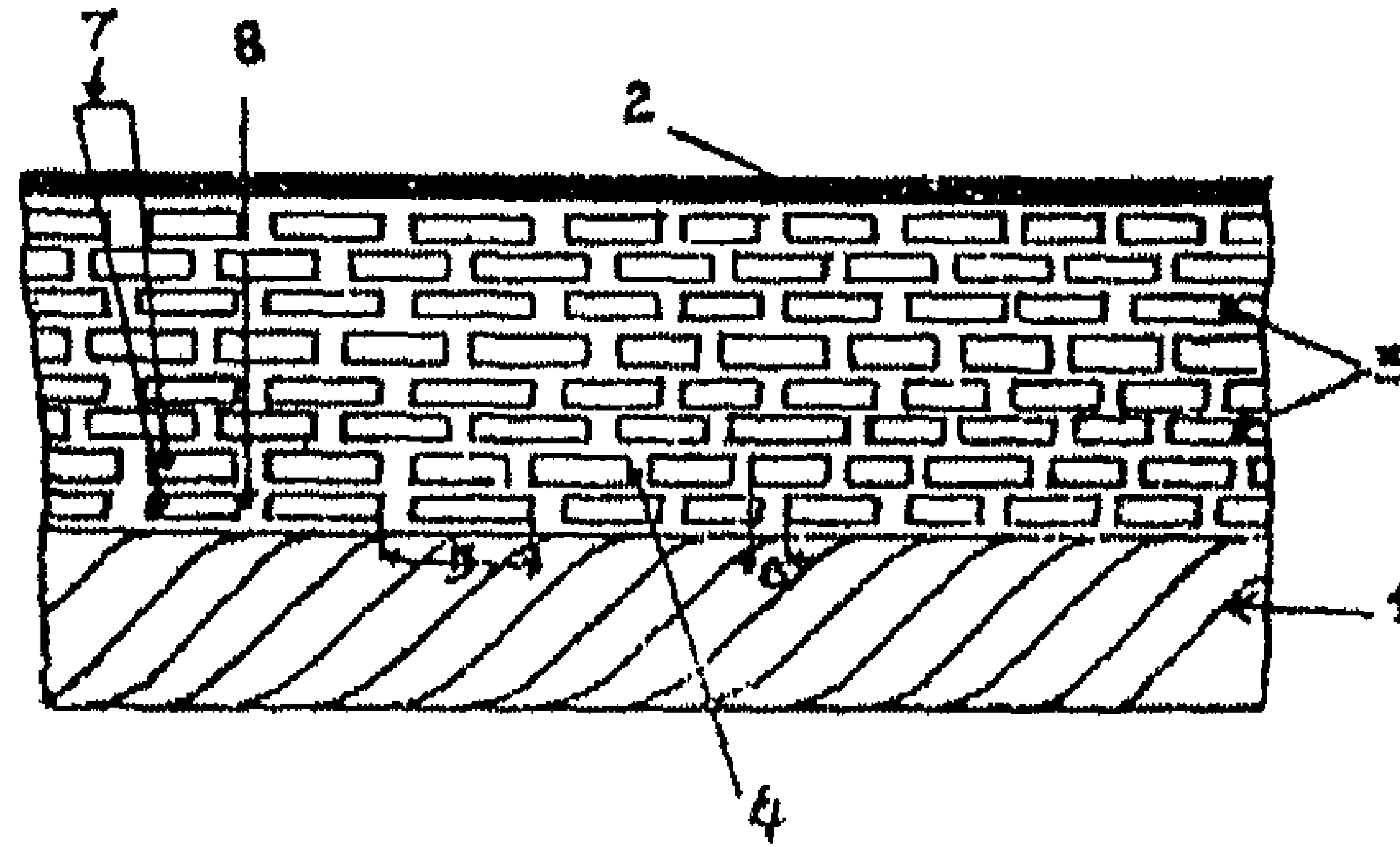
للحجم تحت غلاف الرصاص لتخفيض القطر الخارجي للكابل. يتكون عزل الكابل من جزئين: عزل الطور وعزل الحزام belt. وبهذه الطريقة، يحسب عزل طور مزدوج لجهد الخط بين القلوب وبين كل قلب والغلاف يوجد عزل الطور زائد الحزام. تملأ الثغرات بين القلوب المختلفة المعزولة بعزل منخفض الجودة [حشو filler من الجوت أو قصاصات الورق]. على سطح غلاف الرصاص يتم التزود بشريط صلب أو سلك صلب لزيادة المتانة الميكانيكية للكابل [تدريع]. وهذا الدرع يحمي من الصدأ بواسطة مركب البيتومين.



الشكل 9.26: كابل ثلاثة قلوب مع عزل حزام وله قلوب قطاعية للاستخدام عند 10 kV ويُدفن تحت الأرض. (1) القلب الحامل للتيار؛ (2) عزل الطور؛ (3) عزل الحزام؛ (4) حشو؛ (5) غلاف رصاص؛ (6) وسادة تقوية تتكون من مركب بيتومين، وورق مشرب، وخيوط؛ (7) تقوية من شريطين صلب مغطى بالرصاص كل سمكه 0.8 mm؛ (8) غطاء خارجي يتكون من مركب البيتومين وخيط مُشرب

ويصنع عزل الكابل من ورق عرضه mm (10–30) وسمكه microns (20–120) وملفوف لولبياً طبقة فوق طبقة. في كل طبقة بين حواف الشرائط المتجاورة، توجد ثغرات mm (1.5–3.5)، وبسبب تواجد هذه الثغرات فإن أوراق الكابل لا تدمر بعضها أثناء الانحناء. قنوات الزيت في الثغرة بين الشرائط هي البقع الضعيفة في العزل، بالتالي فأثناء لف الورق، يجب تجنب تطابق الثغرات في طبقتين متجاورتين من الورق ما أمكن. في الشكل 9.27 مثلاً، موضح أنه في 14 طبقة يحدث التطابق مرة واحدة.

يحتوي الورق رطوبة حوالي 10% أثناء لفه تمتص بواسطة أسطح ألياف الورق والهواء. وللتخلص من هذه الرطوبة والهواء، يكون التجفيف تحت التفريغ عند درجة حرارة (120–135)°C أساسياً. وبعد التجفيف، يشرب الورق تحت تفريغ الهواء بواسطة زيت معدني ومركب راتينج في خزانات محكمة الغلق حيث تم تجفيفه فيها.



الشكل 9.27: تركيب عزل ورقي لكابل. (1) قلب حامل للتيار؛ (2) غلاف رصاص؛ (3) شرائط ورق؛ (4) ثغرة بين حواف شريط الورق الملفوف لولبياً؛ (5) خطوة اللف؛ (6) تراكب الشرائط؛ (7) العيب الممكن في العزل على هيئة تطابق شريطين؛ (8) طبقة زيت رقيقة عند مكان تطابق الشرائط

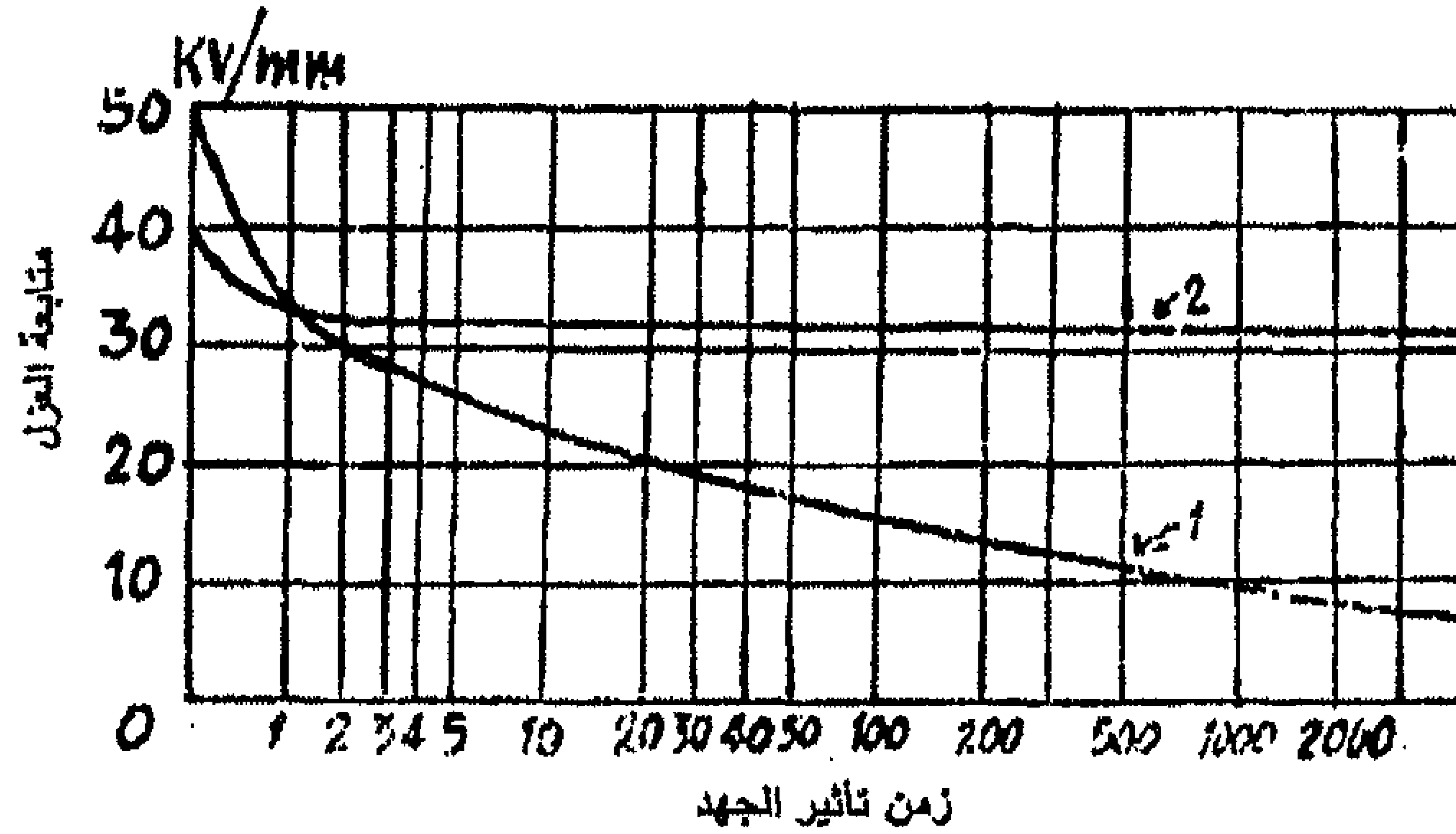
ويكمل الورق والزيت في عزل الكابل كل منهما بنجاح، لذلك فإن شدة تثقب عزل الكابل تكون أعلى من شدة تثقب الزيت والورق منفصلين، ونرى ذلك بوضوح في الجدول 9.5.

الجدول 9.5: خصائص عزل الكابلات بالورق المشرب بالزيت

العزل	المتانة الكهربية دقيقة واحدة عند 20°C (kV/mm)		tan δ	
	شدة التيار المتردد	شدة التيار المستمر	20°C	100°C
ورق جاف	10.6	14.9	2×10^{-3}	3.6×10^{-3}
زيت التشرب	24	34	0.8×10^{-3}	33×10^{-3}
عزل الكابل	57.5	17.4	2.6×10^{-3}	8.5×10^{-3}

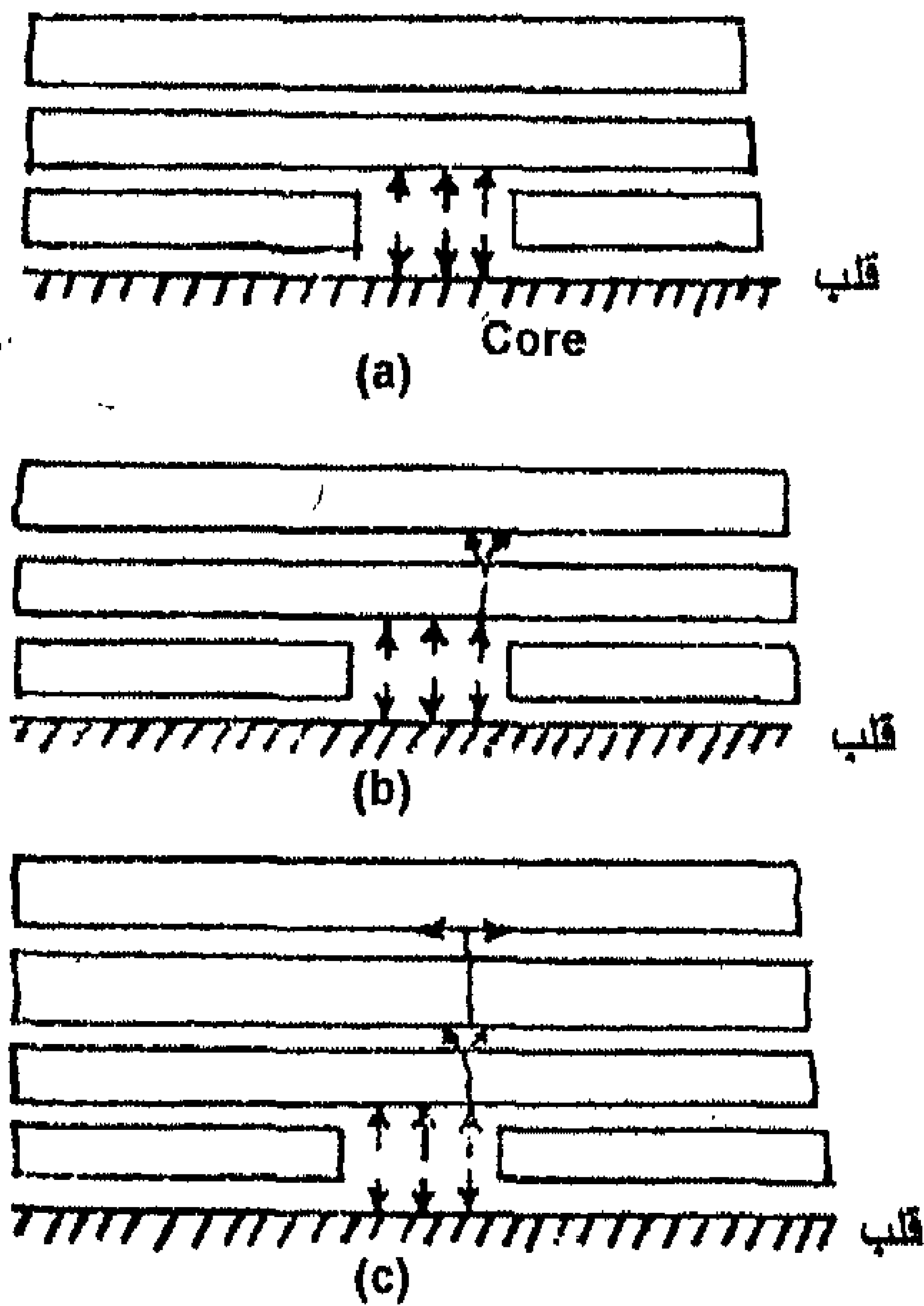
من الجدول 9.5 نرى أن عزل الكابل له متانة كهربية قصيرة الزمن عالية جداً في حدود (50–60) kV/mm عند جهد متردد وهي تتعدى متانة الورق والزيت منفصلين. وعند الجهد المستمر يبقى هذا الفرق أكبر. ولسوء الحظ، فإن المتانة الكهربية للعزل مع تشرب لزج تخفض كثيراً مع زيادة زمن تأثير الجهد، كما نرى في الشكل 9.28 [منحنى 1].

تخفيض جهد الثقب للكابلات ذات التشرب اللزج –وبعبارة أخرى– تخفيض عمره مع زيادة جهد التشغيل يرجع إلى التأين في فجوات الهواء المتكونة أثناء نظام تشغيل الكابل الحراري المتردد.



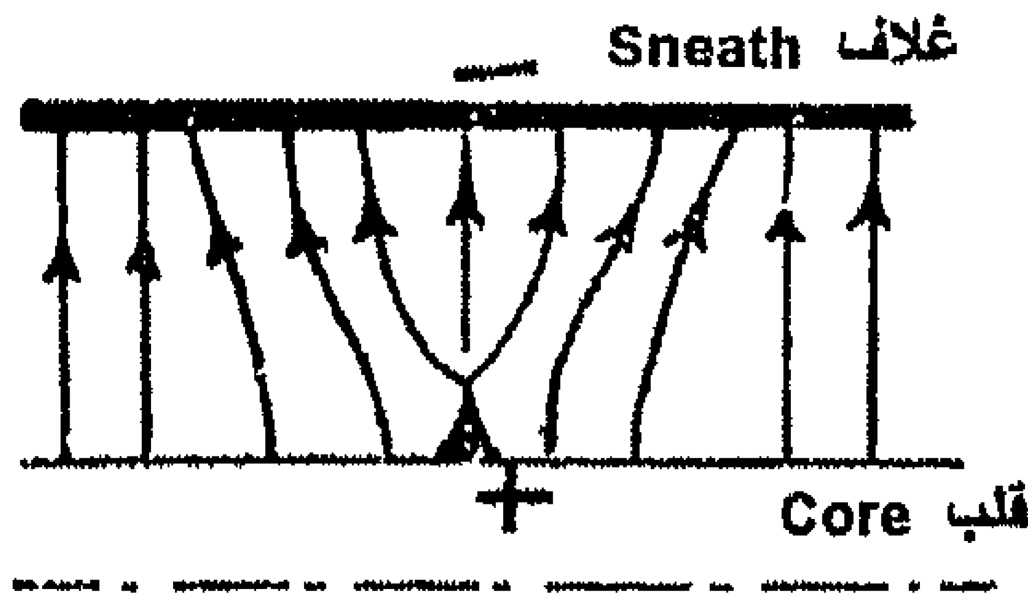
الشكل 9.28: اعتماد متانة العزل الكهربي لكابل معزول بتشرب لزج [منحنى-1] وكابل مملوء بالزيت [منحنى-2] على زمن تأثير الجهد

أي فقاعة غازية موجودة في جوار قلب كابل، تكون في منطقة شدة المجال الأعلى، وبالتالي فإن التأين في الغاز يمكن أن يبدأ عند جهد التشغيل. وبسبب قذف حواف فقاعة الهواء، فإنها تنكسر وتتحول إلى مستحلب غاز-زيت يجبر الزيت على الخروج تدريجياً من مساحات شريط الورق الأقرب ويتغلغل إلى قناة الزيت التالية بين أشرطة الورق. وحيث إن التأين يكون مصحوباً بتدفق تيار محدد، فإن ثقب أو أكثر في أول شريط ورق يتم كربنتها، هكذا تتحول إلى قنوات جيدة التوصيل. في قناة الزيت التالية، تنمو العملية نظرياً ونتيجة لذلك يُخترق شريط الورق التالي [الشكل 9.29].



الشكل 9.29: نمو الثقب مع تكون إبرة موصلة وأفرع شجرية. (a) التأين في الثغرة بين حواف الشريط الأول؛ (b) تكون قناة موصلة في الشريط الثاني واختراق التأين ما بين الشريط الثاني والثالث؛ (c) تكون قناة موصلة في الشريط الثالث واختراق التأين ما بين الشريط الثالث والرابع وبدء التفريغ الماسي

بعد تكوّن القنوات الموصلة في طبقات قليلة من الورق المجاور للقلب، يضطرب المجال الكهربي المحيط بفجوة الهواء كما هو موضح في الشكل 9.30. المركبة المماسية للمجال الكهربي تصنع مظهره ويكون التفريغ قادراً على النمو عبر طبقات الورق. وتكون متانة عزل الكابل أقل عبر هذا المسار وعلى ذلك فإن التفريغ يبدأ في الانحدار عبر طبقات الورق، بالرغم من حقيقة أن هذا المسار يعتبر طويلاً. وبعد الوصول إلى الثغرة المجاورة بين شرائط الورق، يعبر التفريغ إلى الطبقة التالية وبعدها يمكن أن ينمو لليمين ولليسار. خصائص التفريغ المتفرع للكابلات ذات التشرب اللزج المتكون –أحياناً– تصل إلى غلاف الكابل عند مسافة واحد متر أو أكثر من مكان مصدره. بالتناسب مع لحظة التفريغ المتفرع، فإن مستحلب الزيت–الغاز والذي فيه تُصحب عمليات التأين بتحلل كيميائي للورق والزيت يرحل باستمرار عبر القناة.



الشكل 9.30: توزيع المجال عند بداية نمو التفريغ المتفرع

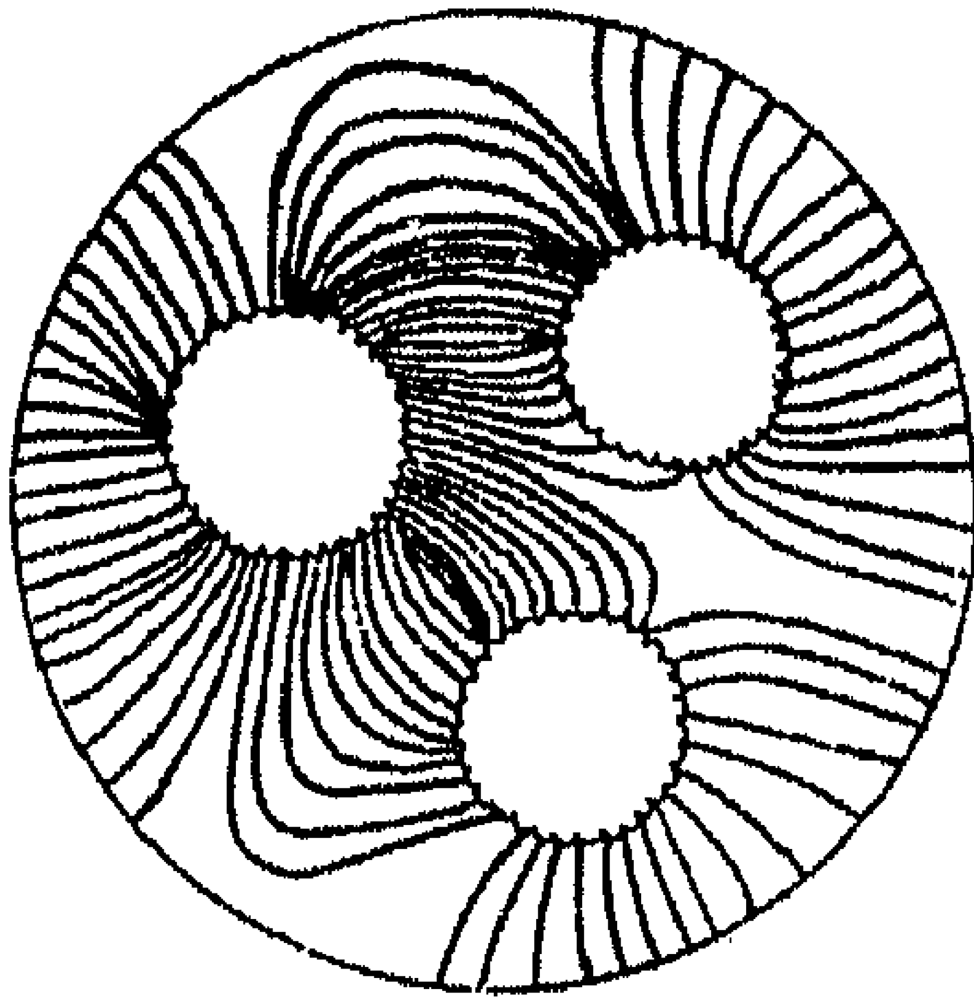
عند شدة المجال العامل المستخدم في كابلات التشرب اللزج، ينمو التفريغ المتفرع ببطء جداً، أحياناً أثناء زمن من عقود قليلة. ولكن مع الزيادة في شدة المجال، فإن سرعة رحيل التفريغات المتفرعة تزداد بسرعة جداً، حيث تزاد شدة تأين مستحلب الغاز–الزيت. واعتماد عمر الكابلات ذات التشرب اللزج على فترة دوام تأثير الجهد يكون مشروحاً إلى حد معقول بواسطة هذه الظاهرة الطبيعية. وبسبب هذه الخصوصية لعزل الكابل ذات التشرب اللزج، فإن شدة المجال العامل الأقل نسبياً والتي تتطلب سمك العازل الموضح في الجدول 9.6 تستخدم في الكابلات حتى جهد 35 kV .

الجدول 9.6: سمك العازل وأقصى شدة عاملة للمجال الكهربي على قلب الكابلات ذات التشرب اللزج

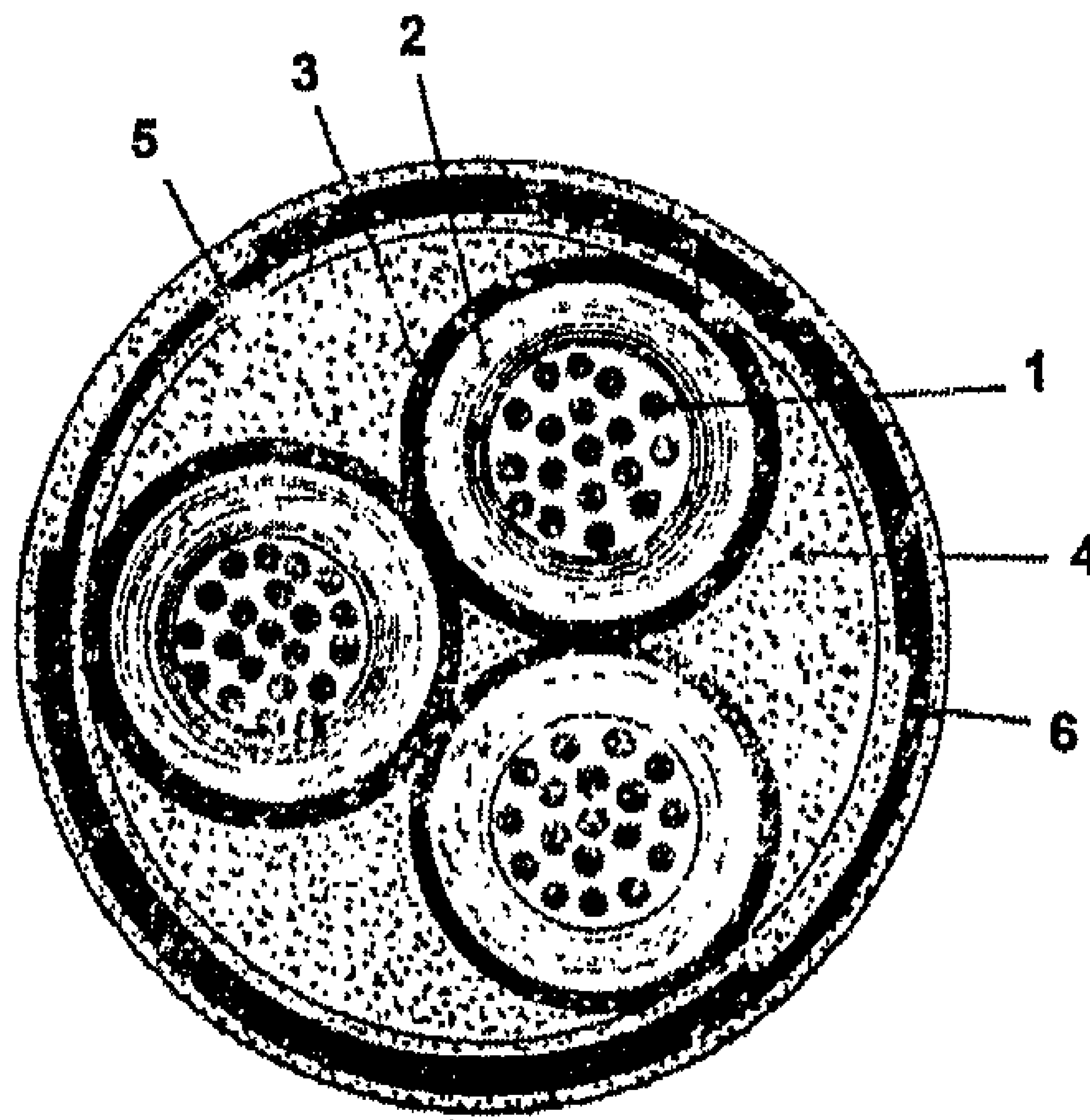
الجهد الاسمى (kV)	سمك العزل (mm)		أقصى شدة مجال مسموحة (kV/mm)
	طور	حزام	
3	1.25	0.95	1.5
6	2.2	1.05	1.5
10	3.0	1.4	1.5
20	*(6–7)	...	2.5–3.0
35	*(9–11)	...	2.5–3.0

* سمك العزل الأكبر يقابل مساحة مقطع قلب الكابل الأصغر.

تثقب عزل الكابل ممكن أن لا يكون متأيناً فقط في الصفة بل يمكن أن يكون حراري أيضاً في الصفة. في الكابلات ذات التشرب اللزج يكون الانهيار الحراري أقل احتمالاً، حيث يمكنه الحدوث عند شدة المجال أكبر من تلك التي عندها تبدأ عملية التأين في النمو. ومع ذلك، فإن نظام درجة حرارة الكابلات له أهمية كبيرة. كابلات الثلاث قلوب لها تركيب غير مفضل من وجهة نظر تبديد الحرارة، حيث إنه من الصعب على الحرارة أن ترحل من الجزء المركزي للكابل إلى الغلاف [الشكل 9.26]. وإلى جانب ذلك، فإن المجال الكهربي لكابلات الثلاث قلوب ليس نصف قطري تماماً [الشكل 9.31]. وتوجد مركبة لشدة المجال موجهة عبر طبقات الورق والتي تخفض من المتانة الكهربية للكابل.



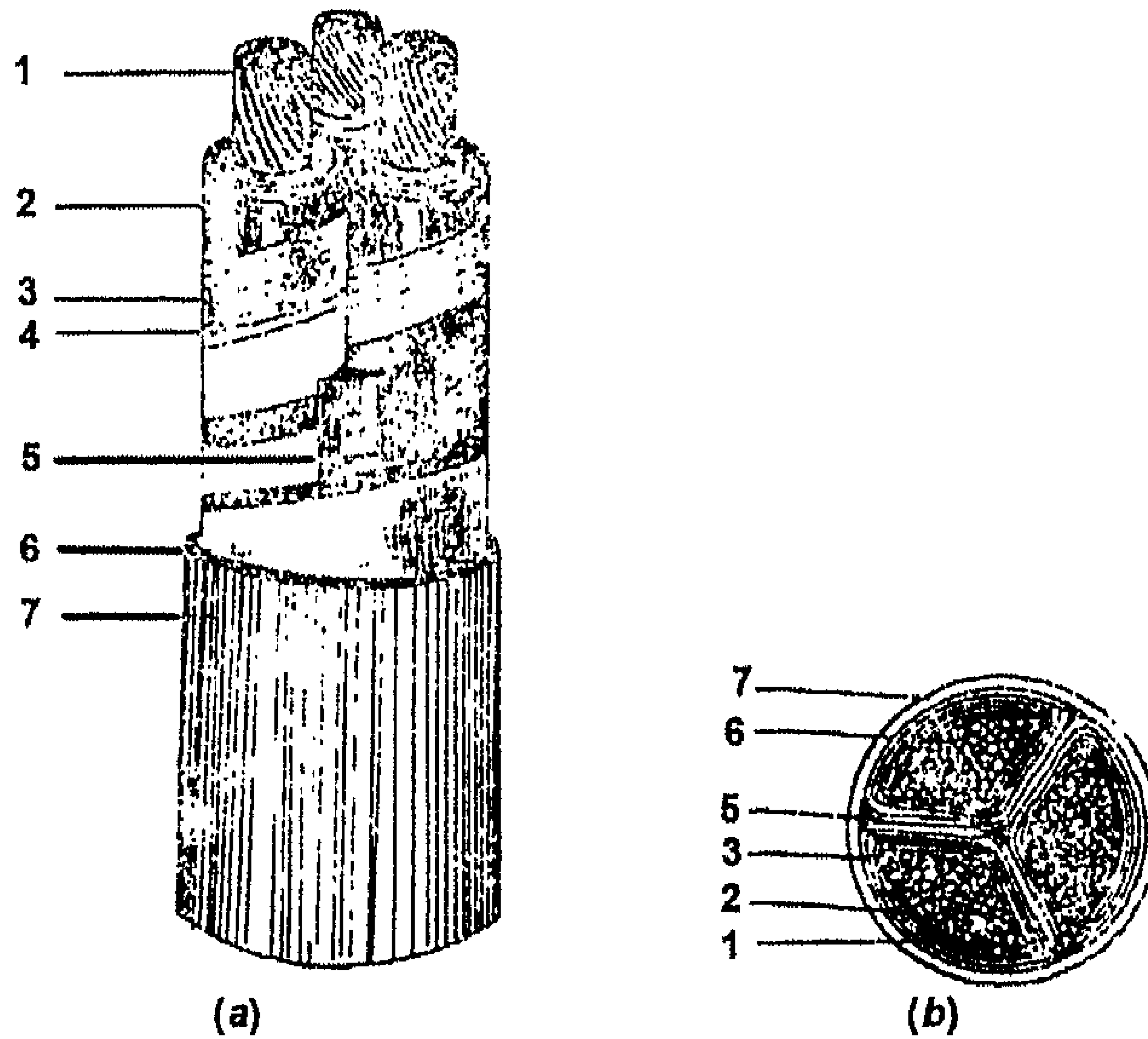
الشكل 9.31: المجال الكهربي لكابل ثلاثي القلب مع عزل حزام



الشكل 9.32: كابل طراز OC5 مع قلوب منفصلة مغطاة بالرصاص. (1) قلب حامل للتيار؛ (2) عزل؛ (3) رصاص أو غلاف بلاستيك للطور؛ (4) حشو بين الأطوار؛ (5) شريط متوسط؛ (6) تقوية من شريطين صلب مع الجوت

لذلك، تستخدم الكابلات ثلاثية القلب مع عزل الحزام belt insulation فقط للجهود 10 kV وأقل. عند الجهود الأعلى (20 kV، 35 kV) تستخدم الكابلات ذات القلوب المنفصلة المغلفة بالرصاص [الشكل 9.32] أو الكابلات ذات القلوب المحجبة screened cores

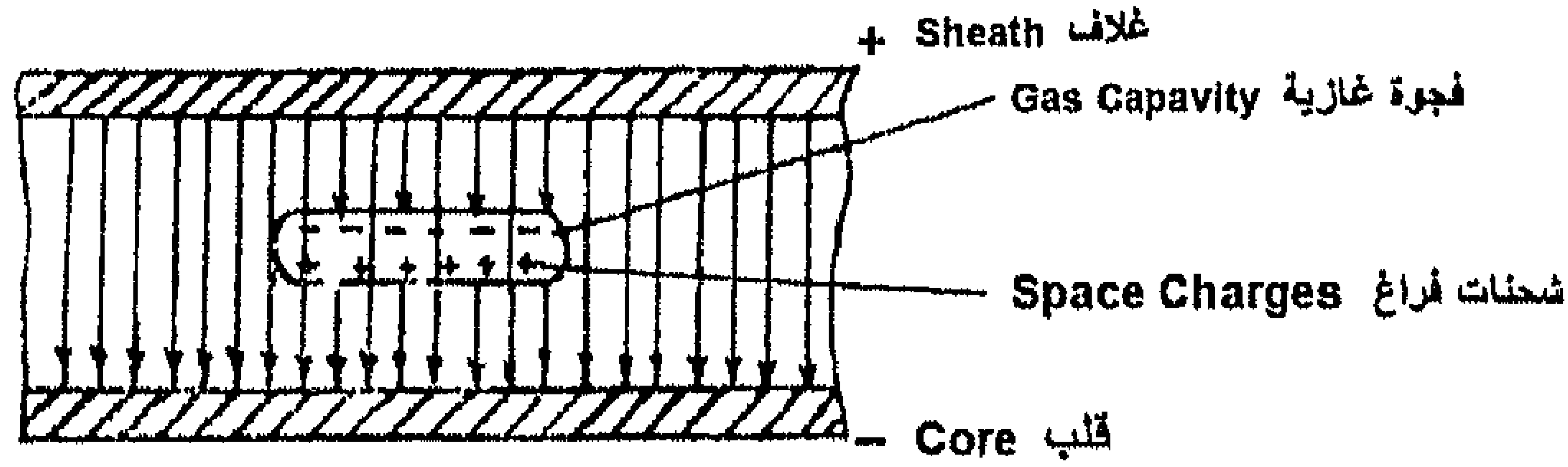
[الشكل 9.33]. في كل من نوعي الكابلات تغطى القلوب بطبقة من الورق المعدني، ونتيجة لذلك فإن شدة المجال الكهربي المحلية على سطح القلب المصنوع جدائل منفصلة تمنع. المجال الكهربي في كلا نوعي الكابل يكون نصف قطري تماماً. وتسمح هذه الحقيقة باستخدام شدة مجال أكبر بمرتين تقريباً مقارنة مع تلك الممكن استخدامها في الكابلات ثلاثية القلب [انظر الجدول 9.5]. الكابلات ذات القلوب المنفصلة المغلفة بالرصاص لها تكلفة مرتفعة ولكنها تحظى بشروط جيدة لتبديد الحرارة من قلب الكابل. وبسبب ذلك، فإنها تسمح بنقل قدرة كهربية أكبر لنفس مساحة مقطع الموصل.



الشكل 9.33: كابل ذو قلوب قطاعية محجبة [بدون تقوية]. (1) قلب حامل للتيار؛ (2) عزل؛ (3) شرائط نحاس؛ (4) شريط ورق متوسط؛ (5) حشو بين الأطوار؛ (6) شريط معدني يوصل أحجبة الثلاث أطوار؛ (7) غلاف رصاص

عند الجهد المباشر [المستمر] يكون لكابلات التشرب اللزج خصائص أكثر جودة، حيث تمنع إمكانية تكون التفريغات المتفرعة. في الفجوة الغازية المتواجدة في جوار القلب ينشأ التأين، ولكن الأيونات المتكونة هنا تستقر على جدران الفجوات، وتضعف المجال الخارجي [الشكل 9.34] ويتوقف التأين. وعند الجهد المتردد فإنه ينتعش في نصف الدورة التالي عندما يغير جهد المصدر قطبيته. وعند الجهد المباشر direct voltage تتدفق الأيونات ببطء جداً خلال موصلية التأين، وبعد ذلك فقط، يبدأ وميض جديد للتأين. ومضات التأين هذه تكون أقل شدة

وتحدث نادراً جداً مما هو في حالة الجهد المتردد، ومن هنا فإن إمكانية تكون التفريغات المتفرعة تمنع عملياً.



الشكل 9.34: انخفاض شدة المجال في فجوات الهواء نتيجة لتكون شحنات حجم عند الجهد المباشر

إلى جانب ذلك، فعند الجهد المباشر يحدد توزيع الجهد عبر سمك العزل بواسطة موصليات conductivities قطاعاته. حيث إن موصلية الورق المشرب تكون دائماً أقل قليلاً من موصلية الزيت، وتتكون أعلى شدة مجال في الورق. وهذا مفضل، حيث إن المتانة الكهربية للورق المشرب تكون أعلى من متانة غشاء الزيت. عند الجهد المتردد يحدد توزيع الجهد بواسطة السعات capacitances وتحدث شدة المجال الأكبر في غشاء الزيت الذي له منفذية كهربية أصغر.

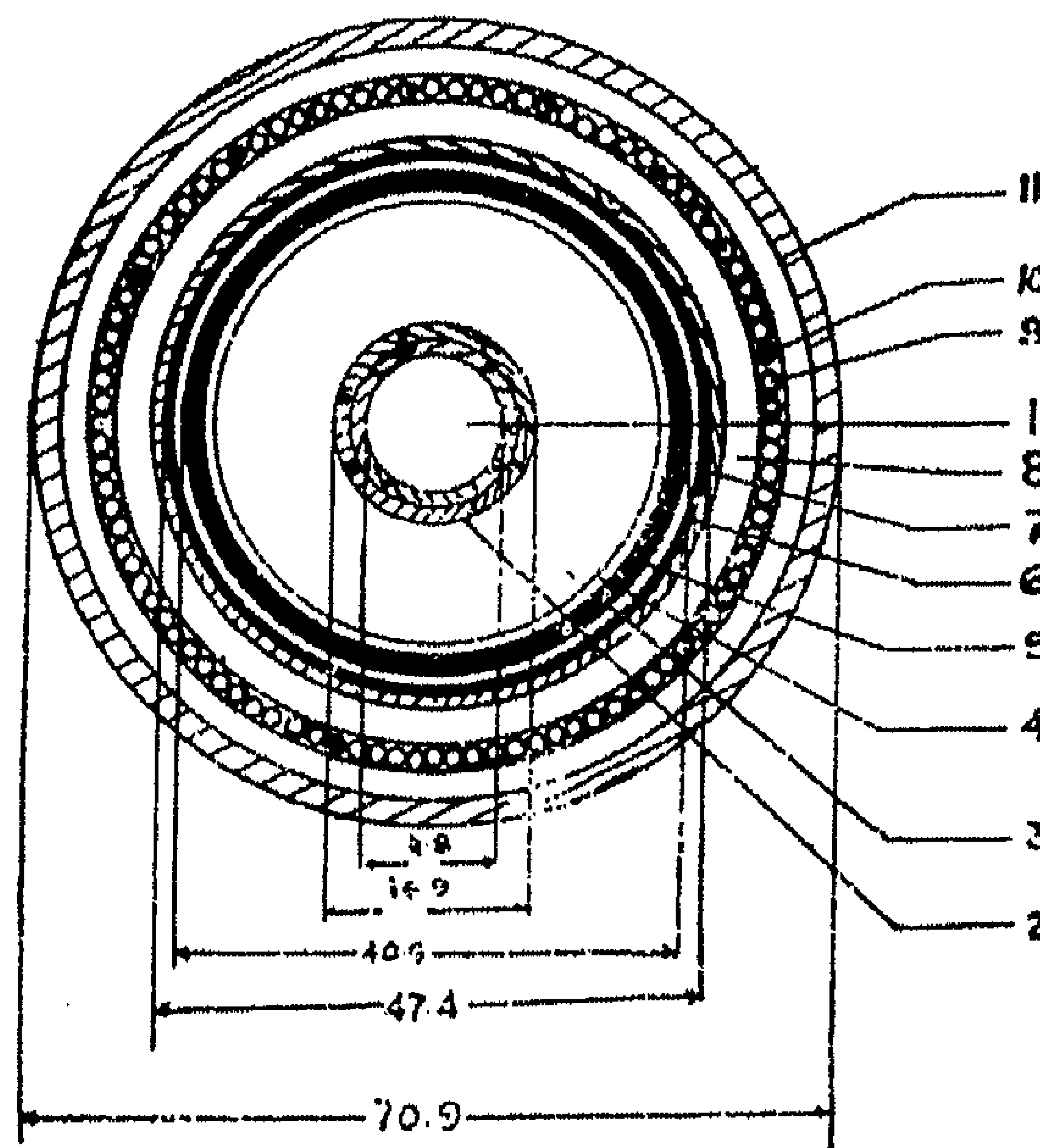
لذلك، فإن شدة المجال العامل في حالة كابلات التشرب اللزج عند الجهد المباشر يمكن أن تزداد إلى kV/mm (35–25) أي (7–5) مرات مقارنة مع سعة [ذروة] الشدة عند الجهد المتردد. وهذا يسمح باستخدام كابلات التشرب اللزج لنقل الطاقة عند جهد مباشر [مستمر] حتى 220 kV .

وإلى جانب ذلك فإن كابلات التشرب اللزج العادية، الكابلات ذات العزل المشرب الناضب تصنع في الصناعة، ويجفف عزل هذه الكابلات ويشرب بالطريقة المعتادة ويتعرض لتسخين إضافي بعد ذلك، حيث يزال أكثر من 70% من الكتلة المشربة من سطح شرائط الورق وحوالي 30% من سمك شريط الورق. وتحتجز الكتلة المتبقية في الورق بواسطة قوى شعرية capillary forces ولا تتدفق إلى الخارج حتى مع التمديد الرأسي للكابل. وهذه هي الميزة الوحدية لكابلات العزل المشرب الناضب impoverishly impregnated insulation cables. الخصائص الكهربية لهذا العزل أسوأ من تلك الخاصة بالعزل العادي ذات التشرب اللزج، حيث إن شروط تكون الفجوات الغازية تكون مقبولة. لذلك، في كابلات العزل المشرب الناضب، يكون مطلوب عزل مع سمك أكبر بحوالي 40% عند جهد 6.1 kV. عند جهد 35 kV وما فوقه

يستخدم العزل المشرب الناضب في الكابلات المملوءة بالغاز ذات التركيب الأكثر تعقيداً والتي سنناقشها لاحقاً في هذا الفصل.

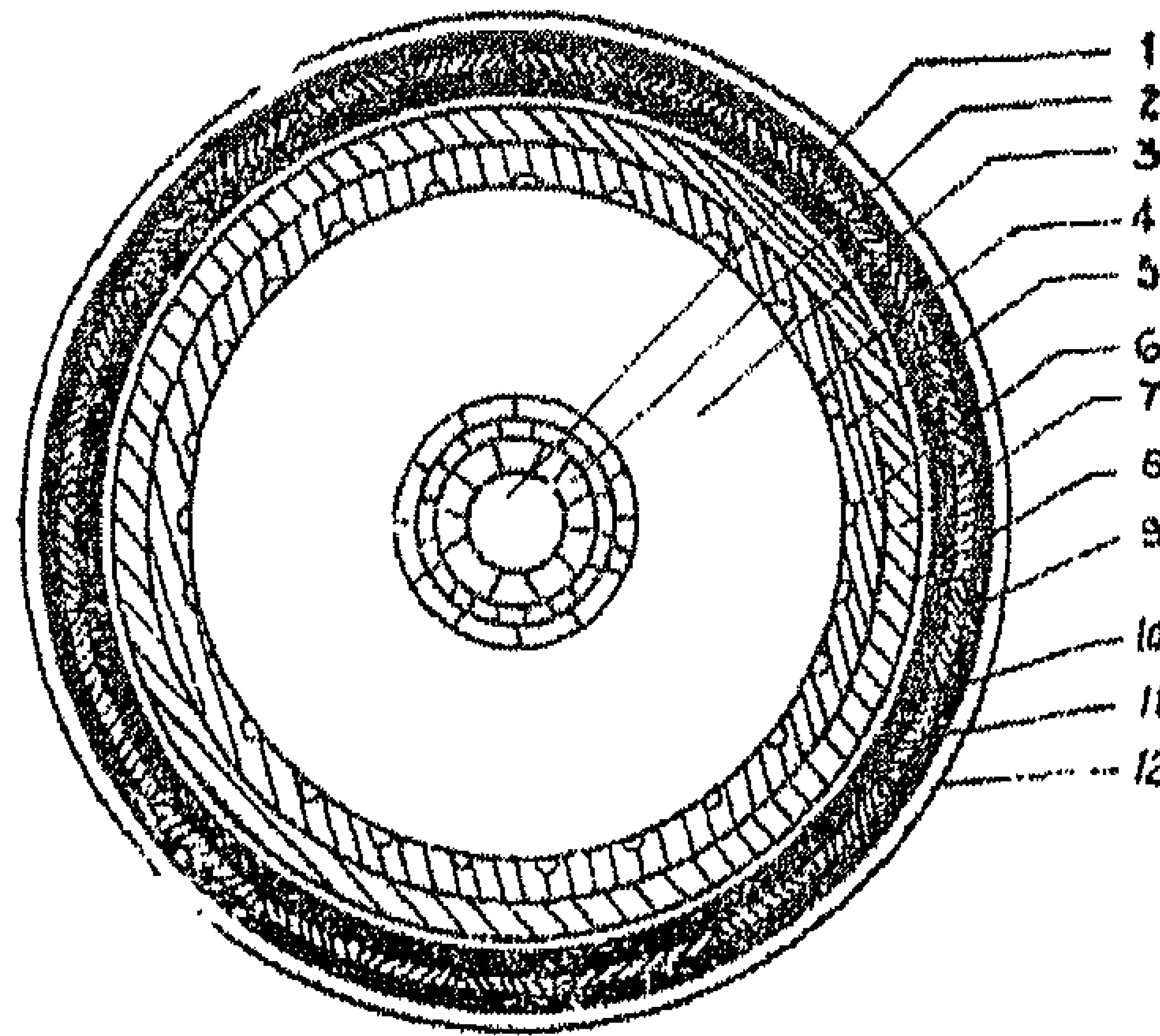
٩-٣-٣ الكابلات المملوءة بالزيت Oil Filled Cables

الكابلات المملوءة بالزيت هي حالياً النوع الرئيسي للكابلات المستخدمة في الجهود شديدة العلو، وكقاعدة، تصنع من قلب واحد. في الكابلات المملوءة بالزيت يستخدم زيت سائل -قادر على الحركة عبر الكابل وملء الفجوات الغازية المتكونة أثناء الدورات الحرارية- لتشرب الورق. ولذلك فأثناء تغير درجة حرارة الكابل يمكن أن لا يتكون تفريغ الهواء المؤقت فيه، ويجب أن يكون الزيت في الكابل تحت ضغط، وكلما زاد ضغط الزيت زادت شدة المجال العامل التي يمكن أن تستخدم في العزل.



الشكل 9.35: كابل مملوء بالزيت 110 kV للتمديد تحت الماء، مساحة مقطعه $120\ mm^2$، ضغط 3 جوي. (1) قناة توصيل الزيت؛ (2) قلب موصل للتيار؛ (3) عزل ورق؛ (4) حجاب ورق معدني؛ (5) غلاف رصاصي؛ (6) بيتومين؛ (7) شريط نحاسي مقوى؛ (8) حماية ضد الصدأ لشريط التقوية تتكون من بيتومين، ورق، راتينج وبلاستيك؛ (9) تقوية من أسلاك صلب؛ (10) أسلاك من مواد غير مغنطيسية؛ (11) غلاف واقي من الورق، والبلاستيك، والجوت

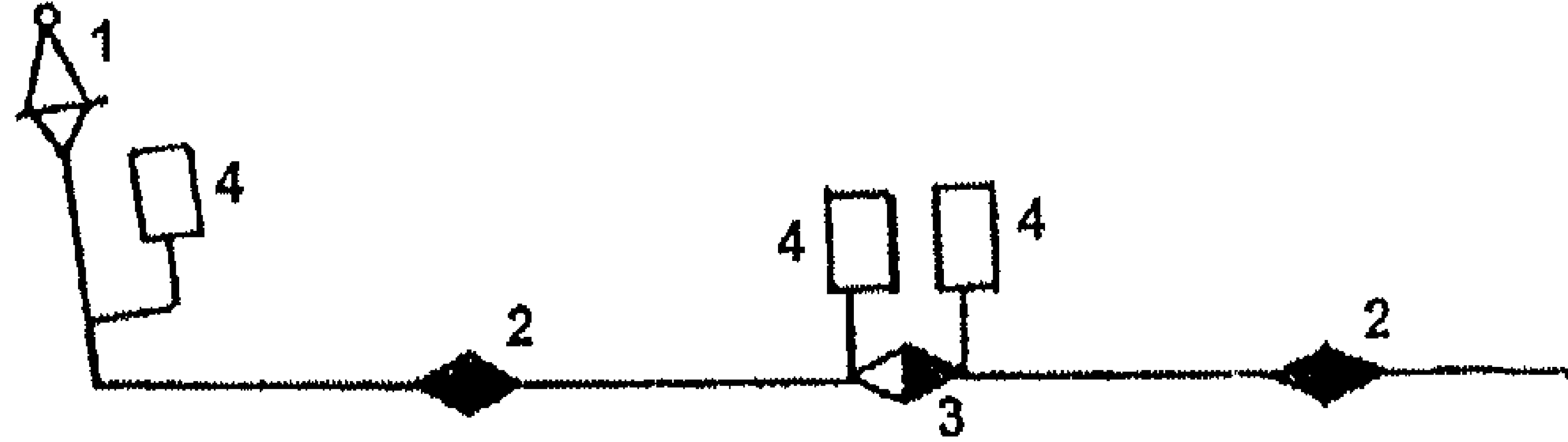
ويوضح الشكل 9.35 قطاع في كابل مملوءة بالزيت للاستخدام عند 110 kV ، وله ضغط زيت 3 جوي. وفي هذا الكابل يصنع القلب مجوف. ولذلك تتكون قناة يمكن أن يتحرك فيها الزيت بحرية في الاتجاه الطولي ويمكن أن يتسرب إلى العزل خلال الثقوب النصف قطرية في القلب. وفي تركيبات أخرى -بعيداً عن قناة الزيت المركزية- تتكون قنوات بسبب وجود ثقوب في غلاف الرصاص.



الشكل 9.36: كابل مملوء بالزيت عالي الضغط يستخدم في 380 kV . (1) قناة حمل الزيت؛ (2) قلب حمل التيار؛ (3) عازل؛ (4) حاجب؛ (5) غلاف مغطى بالرصاص؛ (6) قناة حاملة للزيت في عمق غلاف الرصاص؛ (7) غلاف رصاص ثاني؛ (8) حشو بيتومين وقماش؛ (9-11) عصابة للتقوية في الاتجاه نصف القطري؛ (12) غطاء واقي

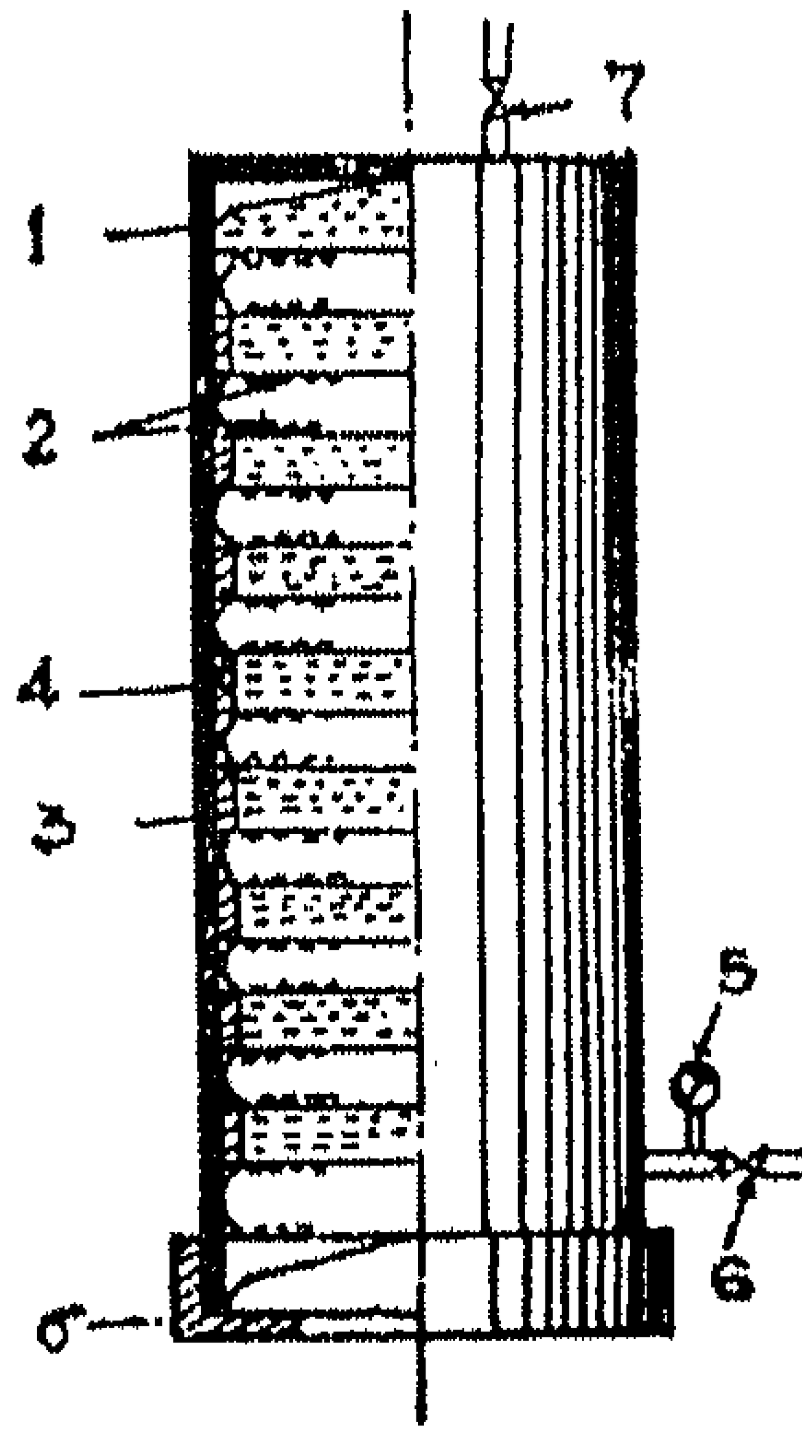
وتعمل معظم الكابلات المملوءة بالزيت الحديثة عند ضغط (5–3) جوي. وهذا يسمح باستخدام شدة عاملة kV/mm (8–6) ، أي أكبر بحوالي ثلاث مرات تلك المستخدمة في كابلات kV (35–20) ذات التشرب اللزج. وهذه الضغوط تقاوم بسهولة بواسطة أغلفة الرصاص العادية المقواة بشريط نحاسي. زيادة ضغط الزيت حتى (15–10) جوي يسمح برفع الشدة العاملة حتى kV/mm (15–10) -ومع ذلك- فإنه يتطلب استخدام تركيبات أكثر تعقيداً من أغلفة الرصاص وعصابات تقوية. لذلك، يستخدم الكابل المملوء بالزيت عالي الضغط في الجهود الأعلى فقط. والمثال الموضح في الشكل 9.36 يبين تركيب كابل مملوءة بالزيت عالي الضغط للاستخدام عند 380 kV . سمك عزل هذا الكابل هو 38 mm وأقصى شدة مجال عامل هي 13.8 kV/mm . ولمساواة توزيع الشدة عبر مقطع الكابل، يلف العزل بورق ذات سمك

مختلف يساوي 0.2 mm في جوار القلب ويتزايد تدريجياً في اتجاه الغلاف. وحيث إن العزل المصنوع من ورق رفيع له قيمة كبيرة إلى حد ما من المنفذية الكهربية ، فإن شدة المجال قريباً من القلب تنخفض وتلك القريبة من الغلاف تزداد، وبذلك فإن توزيع الشدة يصبح أكثر انتظاماً.



الشكل 9.37: مخطط مسار الكابل المملوء بالزيت. (1) قارن طرفي؛ (2) قارن توصيل؛ (3) قارن منع؛ (4) خزان ضغط

وللحفاظ على ضغط ثابت للزيت في الكابل تركب خزانات ضغط وقارنات مانعة [الشكل 9.37] عند كل km (1–2.5) في مسار الكابل أثناء التشغيل. خزانات الضغط عبارة عن أوعية مجعدة مملوءة بالزيت موجودة في خزانات مملوءة بغاز مضغوط [الشكل 9.38]. مع تسخين الكابل فإن ضغط الزيت فيه يزداد ويتدفق جزء من الزيت بعيداً داخل الوعاء المجعد [المعرج] لخزان الضغط والذي يتمدد قليلاً. مع التبريد يرجع الزيت إلى الكابل. في كل الأنظمة يبقى ضغط الزيت في الأوعية المجعدة وقطاعات الكابل القريبة منه ثابتاً. وتقسم قارنات المنع stopper couplings الكابل إلى قطاعات منفصلة تمد بالزيت مستقلة عن بعضها البعض. المسافة بين قارنات المنع يتم اختيارها بحيث يكون التغير في الضغط في وسط القطاع لا يتعدى الحدود المسموحة.

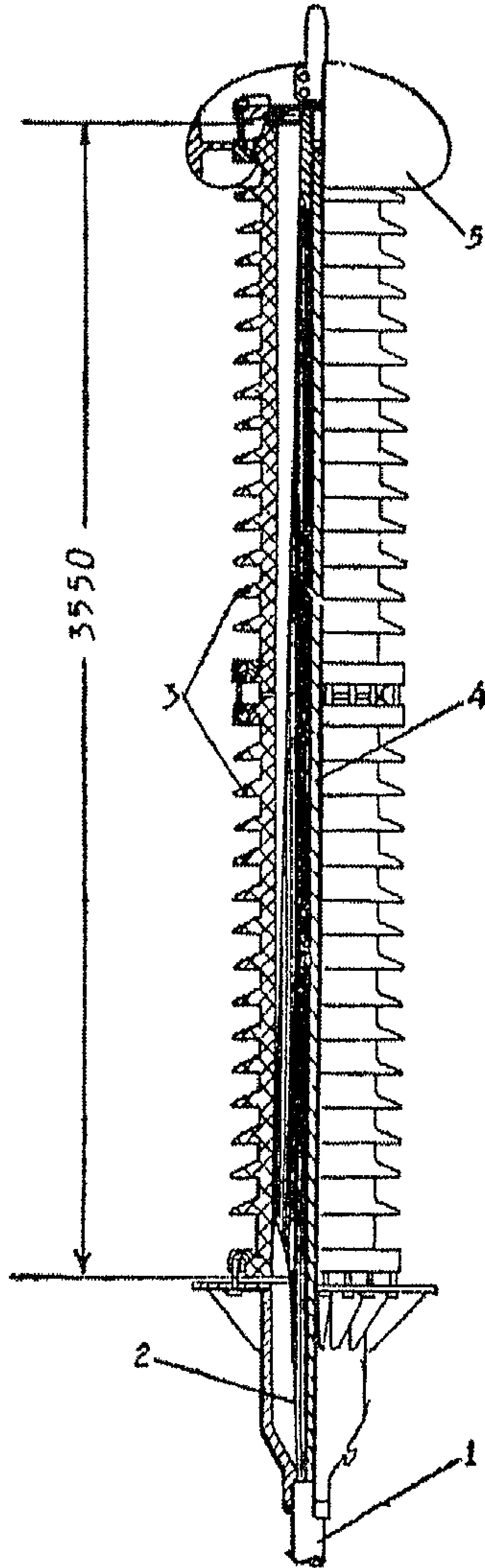


الشكل 9.38: خزان الضغط لضغوط حتى 3 جوي مع سعة 70 لتر. (1) غلاف؛ (2) عنصر بلاستيك؛ (3) حلقات دعم بين العناصر؛ (4) زيت خالي من الغاز؛ (5) مانومتر؛ (6) فوهة لتوصيل الخزان بالكابل؛ (7) مخرج لتنظيف الخزان

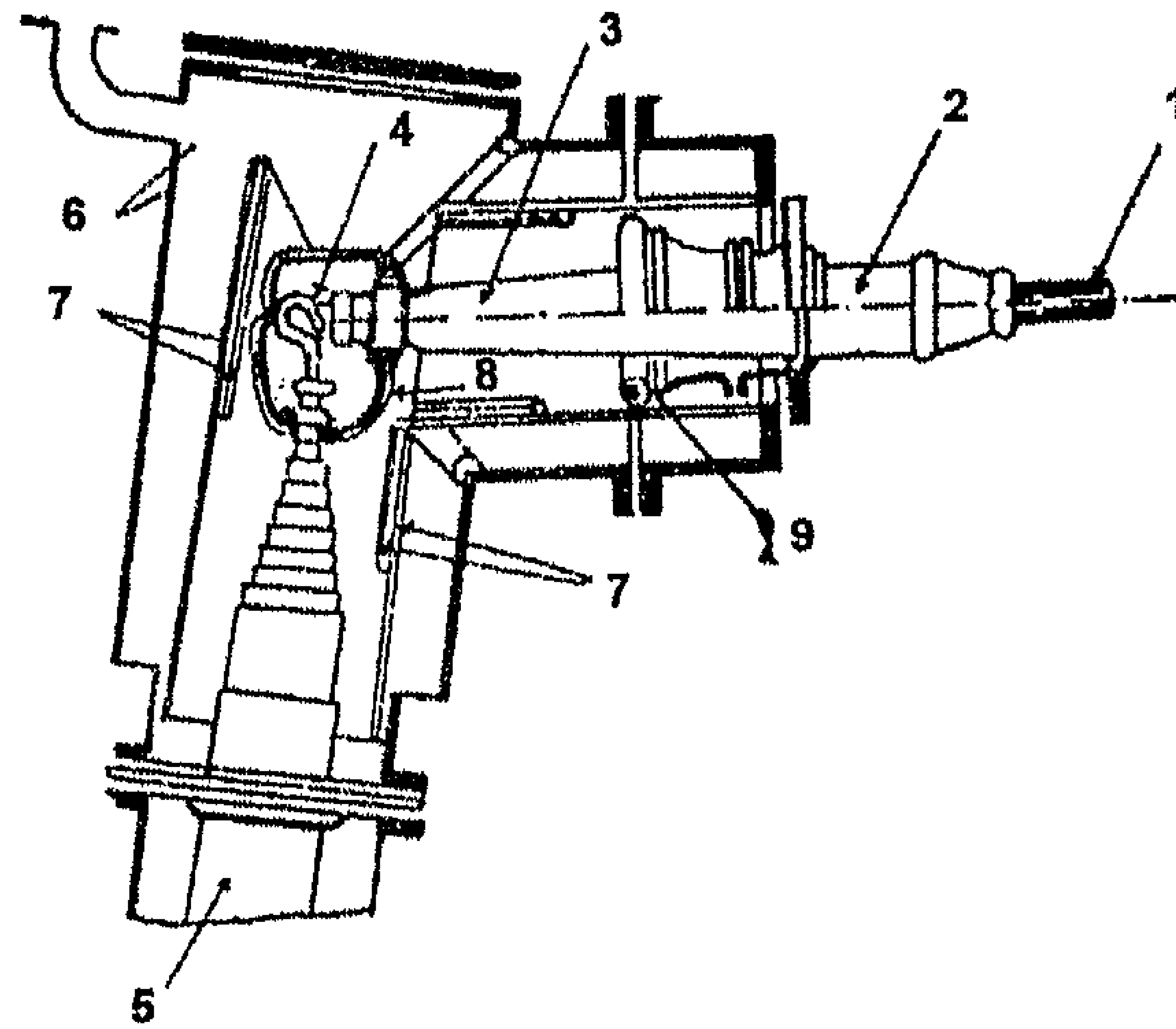
يعتبر تسرب الزيت في الكابلات المملوءة بالزيت تدميراً خطيراً –لذلك– يجب أن يُزود مسار الكابل بنظام إرسال إشارات أوتوماتيكي للضغط عند كل القطاعات، ومانومترات تسمح بكشف الأطوار التي بها تسرب.

المشكلة الخطيرة في كابلات الجهد العالي المملوءة بالزيت هي التزود بقارنات طرفية والتي إلى جانب امتلاكها متانة كهربية عالية، فإنها يجب أيضاً أن تكون محكمة الغلق ويجب أن تضمن توصيل القنوات الحاملة للزيت للكابل بجهاز التغذية. نظام القارنات الطرفية للكابل تكون بعدة طرق مماثلة لنظام جلب المكثف. ويوضح الشكل 9.39 واحد من القارنات الطرفية.

مؤخراً أُستخدم على نطاق واسع توصيل كابلات المحولات الرافعة في محطة هيدروكهربية مع التوزيع الخارجي. في هذه الحالات، يكون مطلوب توصيل جلب المحول مع القارنات الطرفية للكابل. وهذا التركيب للاستخدام عند 135 kV مبين تخطيطياً في الشكل 9.40. في هذا التركيب، يركب الجزء الخارجي من الجلبة والقارن الطرفي في كاميرا مشتركة مملوءة بالزيت. هنا، يكون غطاء البورسلين الخارجي لجلبة المحول غير ضروري لأنها محمية من تأثير العوامل الخارجية [الأمطار، الرماد، ...إلخ]، وبسببها فإن أبعادها يمكن أن تُخفض. في بعض التركيبات، تصنع الكاميرا المملوءة بالزيت بحيث تتكون من جزئين، أحدهما مركب على المحول والآخر مع الكابل. في هذه الحالة، لا يكون من الضروري التزود بغطاء بورسلين للقارن الطرفي.



الشكل 9.39: قارن طرفي 400 kV مع عازل بورسلين لضغط 15 جوي. (1) غلاف رصاصي؛ (2) مخروط تساوي؛ (3) عازل بورسلين؛ (4) مكثف؛ (5) حجاب خارجي



الشكل 9.40: التقديم المباشر لكابل مملوء بالزيت لـ kV 135 في محول رافع. (1) غلاف رصاصي للكابل؛ (2) الجزء العلوي لعازل البورسلين للجلبة والقارن؛ (3) الجزء السفلي لقارن الجلبة للكابل؛ (4) توصيل قلب الكابل إلى عمود جلبة المحول؛ (5) جلبة مكثف المحول؛ (6) خزان متوسط مملوء بالزيت؛ (7) حاجز اسطواني من البكاليت؛ (8) حاجب؛ (9) جسم معدني مؤرض لجلبة الكابل

بسبب حقيقة أنه في الكابلات المملوءة بالزيت يكون تكون الفجوات الغازية أقل احتمالاً وحتى لو تكونت، فإن ضغط الغاز فيهم يكون أكبر من الضغط الجوي. لذلك، فإن التثقب بسبب التأين يمكن أن يحدث فقط عند شدة مجال تتعدى الشدة العاملة. ويحدث الانهيار الحراري للكابل فقط إذا كانت كمية الحرارة الناتجة في العزل بسبب مفقودات العزل الكهربي يتعدى كمية الحرارة المبددة من الكابل. إذا حدث ذلك، تبدأ درجة الكابل في التزايد كارثياً وفي النهاية، يُدمر العزل. لذلك، في الكابلات المملوءة بالزيتن من الضروري استخدام المواد التي لها مفقودات عزل كهربي منخفضة إلى أقصى حد. أثناء عملية تصنيع الكابلات يتم قياس $tan\,\delta$ تكرارياً [عندما وصول الزيت للمصنع، بعد التخلص من الغاز والترشيح والتشريب للكابل وبالمثل بعد تخزين الكابل لأيام قليلة]. بالنسبة للزيت، المسخن لدرجة حرارة 100°C يجب أن لا تكون $tan\,\delta$ أكبر من 0.01 .

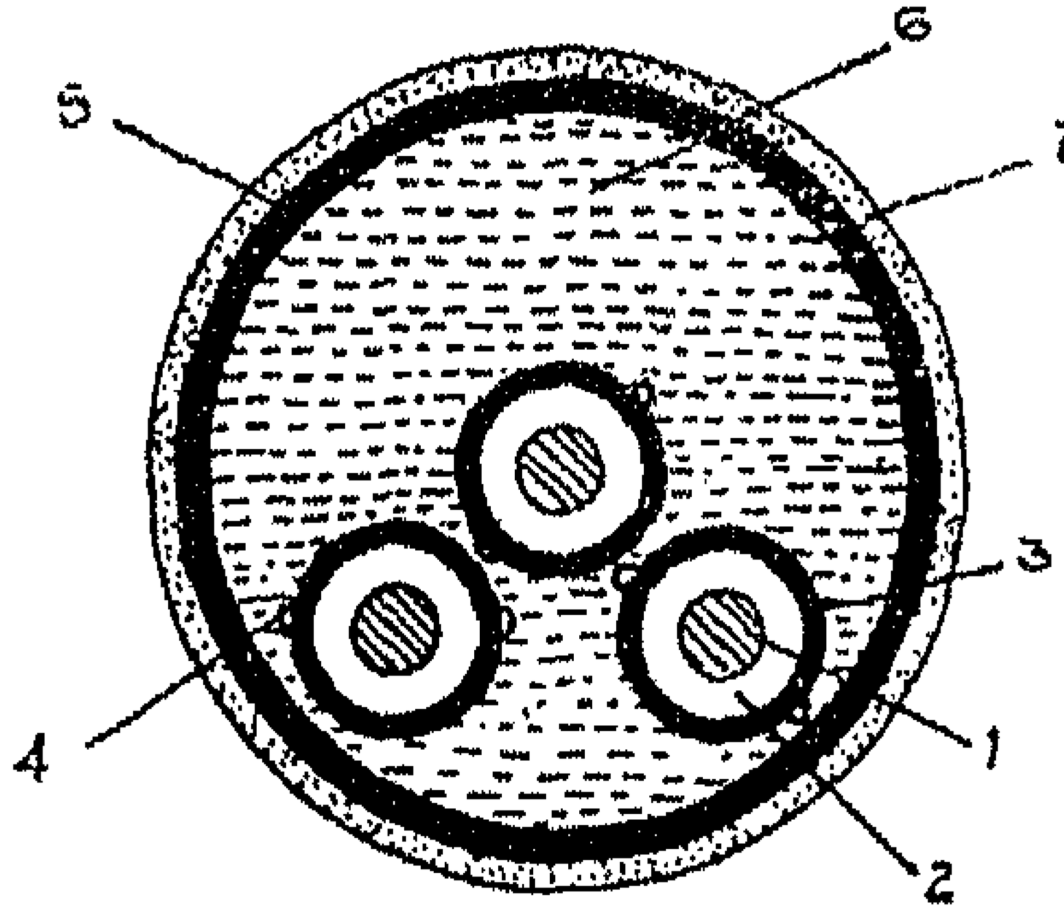
للكابلات المحددة للاستخدام عند جهود شديدة العلو، وبسبب الحجم الكبير للعزل، فإن مفقودات العزل تشكل جزء ملحوظ من المفقودات الكلية. وهذه الحقيقة تجبر على السماح بتيار

تحميل أقل. وهكذا، مثلاً، عند $tan\,\delta = 0.005$ في كابل 110 kV تصبح مفقودات العزل 10% من المفقودات في القلب وفي كابل 400 kV عند $tan\,\delta = 0.003$ تصل إلى 100% –لذلك– من الضروري الاستمرار بحرص جداً في ملاحظة مفقودات العزل الكهربي في المواد العازلة المستخدمة في تصنيع الكابل.

٩-٣-٤ أنواع أخرى من كابلات الجهد العالي Other Types of H.V. Cables

كابلات تحت ضغط الزيت Cables Under Oil Pressure

وهي تجد تطبيقاً عند جهود kV (110–150). وهي تتكون من ثلاثة قلوب مستديرة للكابل، مغطاة بعزل عادي ذات تشرب لزج [الشكل 9.41] وموجودة في أنبوب من الصلب، مملوء بزيت سائل عند ضغط في حدود 15 جوي. العزل مغطى بواسطة حجاب على سطحه غطاء محكم الغلق من البوليسيلين polythelene أو شرائط الألمنيوم. وهذا الغطاء يتجنب تلامس العزل مع الهواء الجوي أثناء النقل وتمديد الكابل. ويجب أن يكون الغطاء مرن بشكل كافي حتى يستطيع نقل ضغط الزيت المحيط به بحرية إلى العزل. ويستخدم أحياناً أغلفة مؤقتة من الرصاص، تُزال عند زمن تمديد الكابل، في كابلات هذا النوع. في هذه الحالة، يكون الزيت تحت الضغط في تلامس مع القلوب المعزولة.



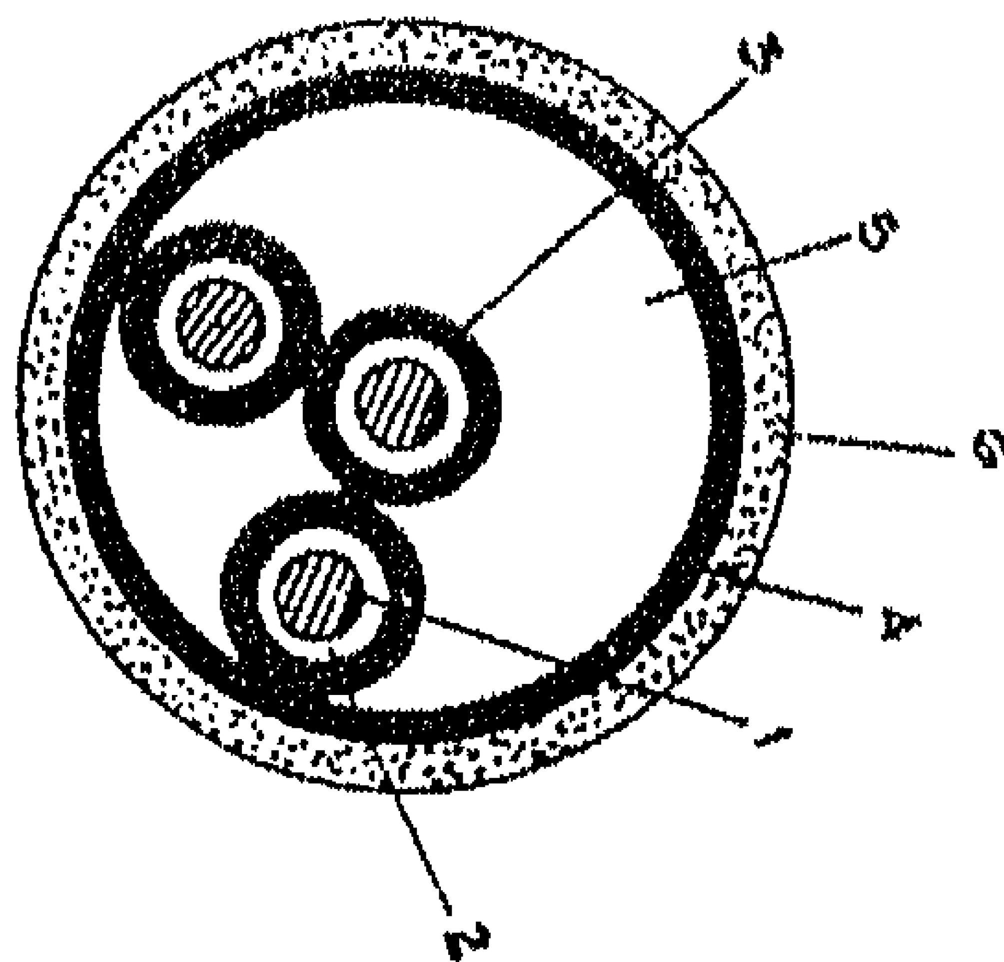
الشكل 9.41: قطاع في أنبوب مع كابل تحت ضغط الزيت. (1) قلب؛ (2) عزل عادي؛ (3) غطاء واقي لإحكام الغلق؛ (4) سلك نصف دائري؛ (5) أنبوبة صُلب؛ (6) زيت؛ (7) غطاء مضاد للتآكل

خصائص الكابل مع الزيت تحت ضغط تناظر تقريباً خصائص الكابلات المملوءة بالزيت، عالية الضغط. الميزة الرئيسية لهم هي الغلاف الأبسط القادر على مقاومة الضغط العالي [أنبوب صلب]. وعيب هذا الكابل هو حجم الزيت الكبير لكل وحدة طول من الكابل، من هنا فللحفاظ على ضغط ثابت للزيت، من الضروري تدبير محطة ضخ آلية معقدة، تتمركز عادة عند مسافة km (10–15) من بعضها. ولكن عامة، يكون خط الكابل ذات الزيت تحت ضغط أرخص بحوالي %(20–30) من خط الكابل المملوء بالزيت عالي الضغط.

كابلات الغاز تحت ضغط Cables with Gas Under Pressure

وهي توضع في أنابيب من الصلب [الشكل 9.42] مملوءة بغاز [النتروجين، ثاني أكسيد الكربون] تحت ضغط جوي 15 جوي. وتغطى قلوب الكابل بعازل له تشريب ناضب، وفوق العزل يوجد غطاء بوليسيلين مقوى بشراط النحاس الأصفر. وينتقل ضغط الغاز إلى عزل الكابل – لذلك– تنشأ فجوات غازية فيه تبدأ في التأين عند شدة مجال كبيرة نسبياً طبقاً لقانون باسشين Paschen's law. وهذا يمكننا من زيادة أقصى شدة مجال حتى (10–12) kV/mm عند ضغط غاز (12–15) جوي.

مسار الكابل المملوء بالغاز يكون أبسط نسبياً في التركيب حيث إنه للحفاظ على الضغط، يكفي وضع اسطوانات بسيطة تحتوي على غاز مضغوط، وللمسار المائل، يكون من غير الضروري اعتبار الضغط الهيدروستاتيكي. في حالة تدمير الأنبوب الحامل للغاز، فإن تسرب الغاز يحدث بسرعة أكبر من تسرب الزيت. ومع ذلك، فإن العزل الذي يبقى في ظروف منضغطة لفترة طويلة، يبقى مُدمج لعدة ساعات بعد إزالة ضغط الغاز ويحتفظ بخصائصه الكهربية السابقة.

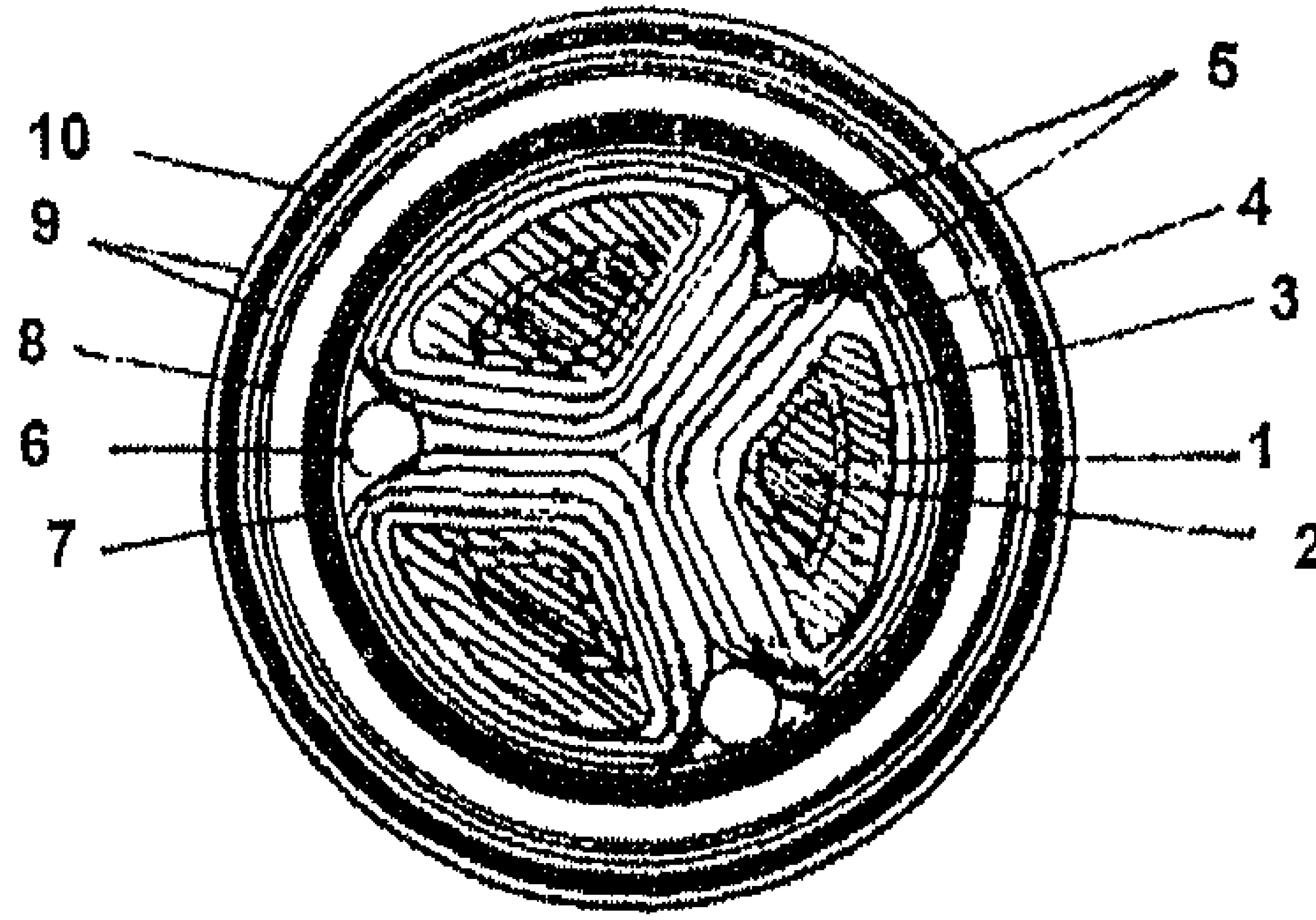


الشكل 9.42: قطاع لأنبوب مع كابل تحت ضغط غاز. (1) قلب؛ (2) عزل؛ (3) غلاف رصاصي؛ (4) أنبوب صُلب؛ (5) غاز؛ (6) غطاء مضاد للتآكل

العيب الرئيسي للكابلات ذات الغاز تحت الضغط هو شروط تبديد الحرارة السيئة والتي تكون هامة خاصة للكابلات المستخدمة في الجهود الأعلى.

الكابلات المملوءة بالغاز Gas-Filled Cables

وهي بالمثل لديها عزل مشرب ناضب يكون فيه الطبقات بين شرائط الورق مملوءة بالغاز. ويستخدم النتروجين كغاز ولكن حديثاً استخدم سداسي فلوريد الكبريت والفريون لضمان خصائص تأين للعزل أكثر تفضيلاً. بعد تنضيب التشرب، يغلف بالرصاص عزل الكابلات المملوءة بالغاز، وبعد ذلك ينفخ ويملأ بالغاز من خلال طرف خاص محكم الغلق ملحوم بغلاف الرصاص من كلا طرفي الكابل.



الشكل 9.43: قطاع في كابل مملوء–بالغاز 35 kV مع مقطع موصل $3\times120\ mm^2$. (1) قلب نحاسي قطاعي، متعدد الموصلات، مقوى؛ (2) حجاب من ورق شبه موصل؛ (3) عزل مشرب، مركب من ورق سمكه 0.12 mm؛ (4) ورق معدني؛ (5) شريط قماش يحتوي على جدائل رفيعة من النحاس؛ (6) أنبوب من الصلب مرن، مغطى بالرصاص يمر خلاله الغاز؛ (7) غلاف رصاص؛ (8) شرائط نحاس صلدة لتقوية غلاف الرصاص؛ (9) طبقة واقية مضادة للتآكل من البلاستيك والبيتومين والقماش المغطى بالمطاط؛ (10) غطاء للتقوية

الكابلات المملوءة–بالغاز، عند جهد حتى 35 kV، تصنع ثلاثية الطور، وعند جهد 110 kV وما فوقه تصنع أحادية الطور. وتستخدم الكابلات المملوءة–بالغاز على نطاق واسع عند جهود حتى 35 kV وتستخدم أساساً في المسارات المائلة بحدة والتمديد الرأسي. في الشكل 9.43 –كمثال– موضح قطاع في كابل 35 kV، ثلاثي القلب مملوء بالغاز يكون فيه الغاز عند ضغط 3.5 جوي. والكابل له قلوب قطاعية، مدمجة، موضوع فوقها حجاب مع ورق شبه موصل. في الثغرات بين القلوب وبالقرب من غلاف الرصاص توجد ثلاث قنوات تحمل الغاز، وهي تضمن حركة الغاز بطول مسار الكابل. اثنان من القنوات مصنوعة على هيئة حلزون معدني مفتوح، وبسببه يستطيع الغاز أن ينفذ بحرية إلى عزل الكابل. الغلاف الرصاص للكابل يكون مقوى بشريطين من النحاس لضمان المتانة الميكانيكية الضرورية.

يستخدم في الكابلات المملوءة–بالغاز ضغوط مختلفة من (12–1.5) جوي، وحسب ذلك فإن شدة المجال العاملة فيهم تتغير من (6.5–2.5) kV/mm . كابلات ضغط الغاز في حدود 3 جوي تستخدم على نطاق واسع. ويتم ضمان الحفاظ على الضغط في الكابلات المملوءة–بالغاز بمساعدة اسطوانات مملوءة بغاز مضغوط له صمامات آلية تنظم بمانومترات تلامس.

٩-٣-٥ كابلات kV (6–20) مع عزل بوليمر (6–20) kV Cables with Polymer Insulation

استخدام البوليمرات لعزل الكابلات يكون مفيداً ونافعاً، أولاً في كابلات التمديد الرأسي، والتي فيها يبدأ عزل البوليمر في الإحلال محل عزل التشرب الناضب الأكثر تعقيداً. وكمثال، يمكن ذكر كابل 6 kV مع عزل بولي كلوروفينيل. وله ثلاثة قلوب نحاس قطاعية ذات مساحة مقطع $120\ mm^2$، مغطاة بالبولي كلوروفينيل سمك 3.6 mm. وبعد الجدل –توضع القلوب المعزولة في علبة [أو غلاف] من مركب راتينج غير مطبوخ يوضع فوقها درع– يغطى بالتالي بغطاء من البولي كلوروفينيل لحماية الدرع من الصدأ والتآكل. القطر الإجمالي لكابل 6 kV يساوي 56 mm ويزن 6.5 tone/km.

٩-٣-٦ اختبارات المصنع لعزل الكابلات Factory Testing of the Cable Insulation

تنفذ اختبارات المراجعة والمراقبة على اللفات الدارية وقطع الكابل المنفصلة للتحقق الروتيني من الجودة والتعرض للعيوب المفاجئة في الإنتاج. في كل طول منتج من الكابل تقاس وتختبر مقاومة القلب الحامل للتيار ومقاومة العزل عند جهد متزايد. كابلات العزل المشرب الناضب والكابلات المملوءة بالغاز تختبر بجهد مستمر، حيث في هذه الكابلات يكون تكون الفجوات الغازية أكثر احتمالاً، وعند جهد متردد متزايد يكون تكون التفريغ المتفرع، التدمير الجزئي للكابل في عملية الاختبار ممكناً. ويوضح في الجدول 9.7 قيم جهود الاختبار للطرازات المختلفة من الكابلات.

الجدول 9.7: جهود الاختبار للكابلات

طراز الكابل	عزل حزام مع تشرب لزج للآتي		تغليف طور مع تشرب لزج لـ 35 kV	مملوء بالغاز للآتي		مملوء بالزيت (مؤرض التعادل) لـ 110 kV
	6 kV	10 kV		10 kV	35 kV	
قيمة جهد 50 cycles	14.2	23	65	–	–	140
الزمن بالدقيقة	10	10	20	–	–	15
جهد d.c	–	–	–	40	130	–
الزمن بالدقيقة	–	–	–	30	30	–

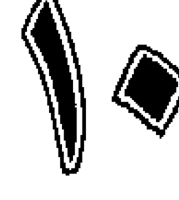
كما أشرنا سابقاً، فإن قيمة $tan\ \delta$ للعزل تكون ذات أهمية للكابلات المملوءة بالزيت عالية الجهد. وبالنسبة للكابلات ذات التشرب اللزج، تكون القيمة المطلقة لـ $tan\ \delta$ ذات أهمية أقل –على العكس– فإن طبيعة تغير $tan\ \delta$ مع تزايد الجهد تكون مهمة جداً، حيث إن الزيادة

السريعة لـ $tan\,\delta$ تشهد بوجود فجوات غازية في الكابل. في الكابلات المملوءة بالغاز، حيث تكون فجوات الغاز جزء غير منفصل من العزل، فإن الجهد الذي يبدأ عنده التأين يقاس عادة إما بقياس $tan\,\delta$ أو بطرق أخرى. المعايير المستخدمة في روسيا لتحديد $tan\,\delta$ ومقاومة التسرب للعزل معطاة في الجدول 9.8.

الجدول 9.8: معايير تحديد $tan\,\delta$ ومقاومة التسرب لعزل الكابل

طراز الكابل	مع عزل حزام مع تشرب لزج للآتي		تغليف طور مع تشرب لزج للآتي	مملوء بالغاز للآتي		مملوء بالزيت للآتي
	6 kV	10 kV	35 kV	10 kV	35 kV (مؤرض تعادل)	110 kV (مؤرض تعادل)
الجهد أثناء قياس $tan\,\delta$	14	23	65	14	40	70
أقصى قيمة مسموحة لـ $tan\,\delta$ عند درجة حرارة الغرفة	0.02	0.015	0.01	0.025	0.025	0.006
حدود الجهد أثناء قياس $tan\,\delta$	4–14	4–23	10.5–65	–	–	$20(0.3V_{ph})$ upto $1.5V_{ph}$
أقصى زيادة مسموحة لـ $tan\,\delta$	0.008	0.006	0.0025	–	–	–
مقاومة التسرب meg.ohm/km من طول الكابل	100	100	100	200	400	–

الاختبار الكهربي لعزل الكابل لا يستطيع الكشف عن كل العيوب التكنولوجية والانحرافات عن التصميم. هذه العيوب تكشف ببساطة بواسطة فك قطعة من الكابل طولها في حدود 300 mm وهي تقطع من كل طول منتج من الكابل، ويعطى اهتمام خاص للتحكم في تجانس تصنيع العزل وتطابق شرائط الورق، وخاصة بالقرب من القلب أثناء الفك. القدرة على مقاومة الانحناء، والذي يمكن أن يسبب كسر شرائط الورق وتشقق الغلاف الرصاص، يتحقق بأطوال الكابل لكل الجهود. مع وضع هذا الهدف موضع اعتبار، تُلف قطع كابلات طول 5 m على اسطوانة، قطرها أكبر بخمسة عشر مرة من قطر الكابل متعدد القلوب، وأكبر 25 مرة للكابلات مفردة القلب. ثم يفك الكابل ويستقيم، وبعد ذلك يُلف مرة ثانية على الاسطوانة في الاتجاه المعاكس. وهذه العملية تكرر ثلاث مرات، وبعدها يتم التحقق من المتانة الكهربية للكابل.



قياس الجهود والتيارات العالية

Measurement of High Voltages & Currents

١٠-١ مقدمة Introduction

القياسات العابرة مشتركة في الكثير مع قياسات الكميات مستقرة الحالة ولكن الطبيعة قصيرة العمر للعابرات transients التي نحاول تسجيلها تشكل مشاكل خاصة. وفي الغالب فإن الكمية العابرة المراد قياسها لا تسجل مباشرة بسبب كمياتها الكبيرة فمثلاً عند استخدام دائرة توازي لقياس تيار، نحن في الحقيقة نقيس الجهد عبر الدائرة وبعد ذلك نفترض أن الجهد يتناسب مع التيار، وهي حقيقة لا يجب أن تؤخذ كأمر مسلم به للتيارات العابرة. وغالباً يمكن أن يكون الجهد الظاهر عبر دائرة التوازي غير كافي لتشغيل جهاز القياس، فهو يتطلب تكبير. ومن جهة أخرى، إذا كان الجهد المقاس كبيراً جداً لدرجة أن لا يمكن قياسه بأجهزة القياس العادية، فيجب أن يوهن attenuated. وهذا يقدم فكرة لنظام قياس وليس جهاز قياس.

وتشمل قياسات الجهود والتيارات العالية مشاكل كثيرة التعقيد والتي يجب أن لا يواجهها المتخصص في القياسات الكهربية العادية. معدات الجهد العالي لها سعات شاردة كبيرة بالنسبة للمنشآت المؤرضة وبالتالي تنشأ تدريجات جهد كبيرة. ويجب حماية الشخص الذي يتعامل مع هذه المعدات وأجهزة القياس ضد هذه الجهود الزائدة. ولهذا، مطلوب من المنشآت الكبيرة أن تتحكم في المجالات الكهربية وتتجنب حدوث الشرر بين المعدة والمنشآت المؤرضة. أحياناً، يكون مطلوب من هذه المنشآت أن تتحكم في تبديد الحرارة داخل الدوائر. لذلك، فإن موقع وتخطيط المعدات يكون هاماً جداً لتجنب هذه المشاكل. وتخلق المجالات الكهرومغنطيسية مشاكل في قياسات الجهود والتيارات النبضية ويجب الحد منها وتقليلها.

وهذا الفصل مخصص لوصف الأجهزة والدوائر المختلفة لقياس الجهود والتيارات العالية. وسنناقش أيضاً تطبيقات الجهاز لنوع الجهود والتيارات.

١٠-٢ ثغرة الكرة Sphere Gap

تعتبر ثغرة الكرة الآن واحدة من الطرق القياسية لقياس قيمة الذروة لـ d.c ، a.c والجهود النبضية وتستخدم لمراجعة الفولتمترات وأجهزة قياس الفولت الأخرى المستخدمة في دوائر اختبار الجهد العالي. وهي عبارة عن كرتان معدنيتان متماثلتان منفصلتان بمسافة معينة لتشكل ثغرة كروية. ثغرة الكرة يمكن أن تستخدم لقياس الجهد الدفعي [النبضي] لكلا القطبيتان بشرط أن يكون الدفع ذات شكل موجة قياسية standard waveform وله زمن جبهة موجه 1 µ sec. على الأقل وزمن ذيل موجة 5 µ sec. . أيضاً، فإن طول الثغرة بين الكرتين يجب أن لا يتعدى نصف قطر الكرة. وإذا تحققت هذه الشروط وأيضاً تحققت المواصفات الخاصة بالشكل، التركيب، خلوصات الكرات، فإن النتائج المتحصل عليها باستخدام ثغرات الكرة تكون مؤكدة في حدود ±3%. وقد اقترح في المواصفات القياسية أنه في الأماكن التي تكون إتاحة الأشعة فوق البنفسجية منخفض بها فإن التعرض للإشعاع للثغرة بواسطة الفعالية الإشعاعية أو أي وسط تأين آخر يجب أن يستخدم عند قياس جهود ذات مقدار أقل من 50 kV أو عندما نريد الحصول على جهود أعلى بنتائج دقيقة.

ولكي نفهم أهمية التعرض للإشعاع لثغرة الكرة عند قياس الجهود الدفعية وخاصة ذات فترة الدوام القصيرة، من الضروري أن نفهم التأخير الزمني المشمول في نمو عملية الشرر. ويتكون هذا التأخير الزمني من مركبتين:

١. التأخير الزمني الإحصائي statistical المتسبب بالحاجة لظهور إلكترون في الثغرة أثناء تأثير الجهد.

٢. التأخير الزمني المشكل formative وهو الزمن المطلوب لنمو الانهيار بمجرد البدء.

ويعتمد التأخير الزمني الإحصائي على مستوى التعرض للإشعاع في الثغرة. فإذا تعرضت الثغرة للإشعاع بدرجة تكفي لتواجد إلكترون في الثغرة لبدء عملية الشرر وإذا تعرضت الثغرة لجهد دفعي، سيحدث الانهيار عندما يتعدى جهد الذروة قيمة الانهيار d.c. ومع ذلك، إذا كان مستوى التعرض للإشعاع منخفض، يجب أن يحفظ الجهد فوق قيمة انهيار d.c لفترة أطول قبل ظهور الإلكترون. وقد استخدمت طرق مختلفة للتعرض للإشعاع، مثلاً المواد المشعة،

الإضاءة بالأشعة فوق البنفسجية المستمدة من لمبة قوس الزئبق وتفريغات الكورونا.

وقد لوحظ إمكانية حدوث تغيير كبير في خصائص التأخير الزمني الإحصائي لثغرة عندما تُضاء بمصدر ضوء محدد، إذا لم تكن شروط الكاثود محددة بدقة أيضاً.

التعرض للإشعاع بواسطة مواد مشعة يتميز بأنه يمكن أن يكون مصدر مستقر للتعرض للإشعاع وأنه ينتج كمية من التأين في الثغرة تكون مستقلة كثيراً عن جهد الثغرة وعن شروط سطح الإلكترود. ويمكن وضع المادة المشعة داخل إلكترود جهد عالي بالقرب من خلف سطح الشرر أو يمكن أن تشكل المادة المشعة سطح الشرر.

تأثير الضوء من ثغرة شرر مولد دفعي على تشغيل ثغرات الكرة تم دراسته. وهنا تكون الإضاءة شديدة وتحدث عند لحظة معينة عندما تكون مطلوبة، وبالاسم، عند لحظة تأثير موجة الجهد على ثغرة الكرة.

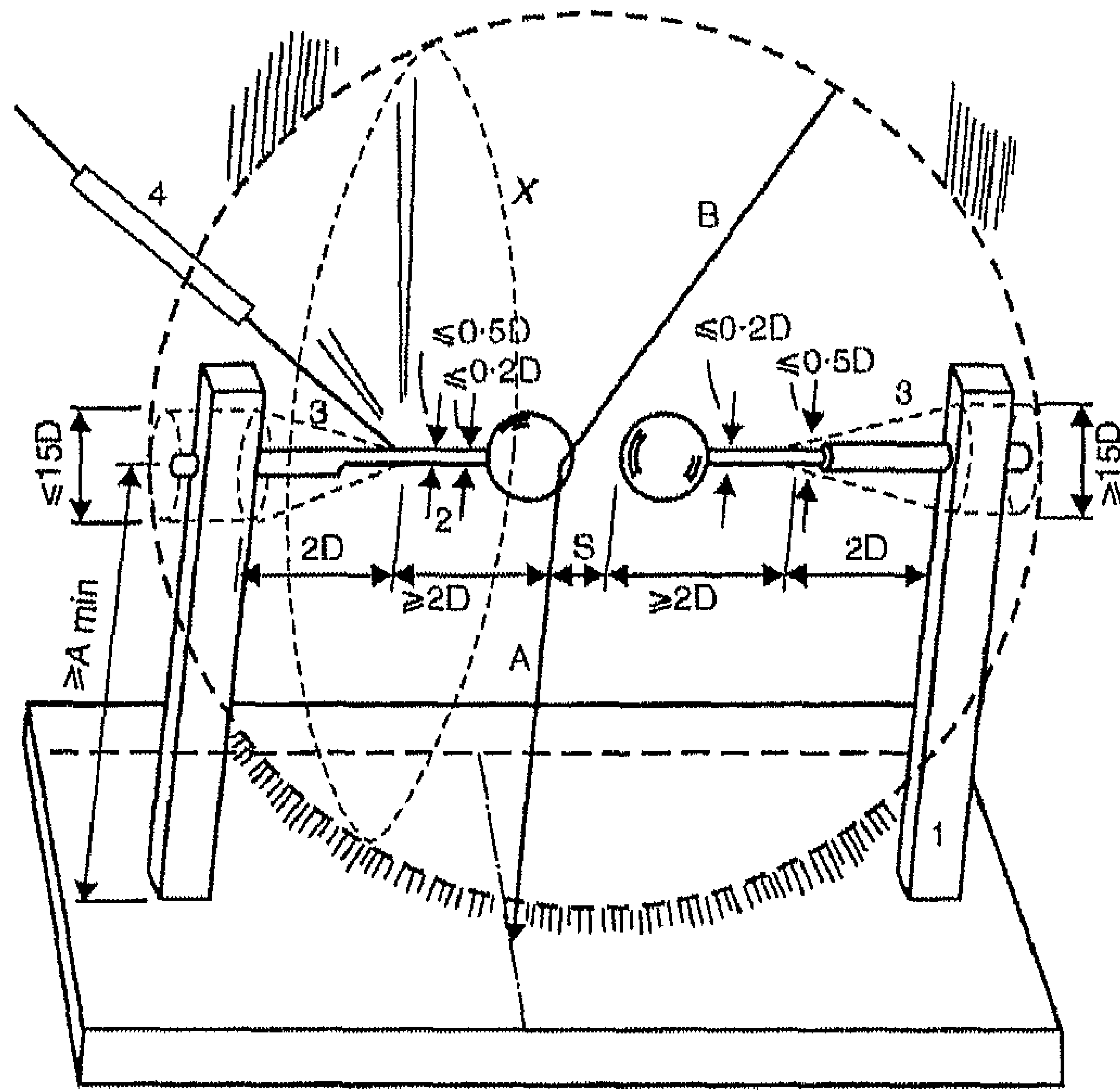
ويعتمد التأخير الزمني المشكل أساساً على آلية نمو الشرارة. في حالة انبعاث إلكترون ثانوي، يكون الزمن العابر المأخوذ بالأيون الموجب ليرحل من الآنود إلى الكاثود هو الذي يقرر التأخير الزمني المشكل. والتأخير الزمني المشكل ينخفض مع الجهد الزائد المؤثر ويزداد مع طول الثغرة وعدم انتظام المجال.

مواصفات الكرات والتوابع المرافقة Specifications on Spheres & Associated Accessories

يجب أن تصنع الكرات بحيث يكون سطحها ناعماً وانحناءه منتظم ما أمكن. ويجب أن يقاس انحناء السطح بواسطة مقياس تكور sphero meter عند أماكن مختلفة عبر مساحة محاطة بدائرة نصف قطرها $0.3D$ حول نقطة الشرر حيث D هي قطر الكرة ونقط الشرر على الكرتين هما تلك اللتان عند أدنى مسافة من بعضهما.

وللحجم الأصغر، توضع الكرات في شكل أفقي بينما في الحجوم الكبيرة [الأقطار]، تركب الكرات مع محور ثغرة الكرات رأسي وتؤرض الكرة السفلية. في كلا الحالتين، من المهم أن توضع الكرات بحيث يكون الفراغ بينهما خالي من المجالات الكهربية الخارجية ومن الأجسام التي يمكن أن تؤثر على المجال بين الكرات [الشكل 10.1، 10.2].

طبقاً لـ BSS 358: 1939 عندما تؤرض كرة، فإن المسافة من نقطة الشرر لكرة الجهد العالي إلى مستوى الأرض المكافئ الموصل به الكرة المؤرضة يجب أن يقع داخل الحدود المعطاة في الجدول 10.1.



الشكل 10.1: ثغرة كرات أفقية (كرات صغيرة)

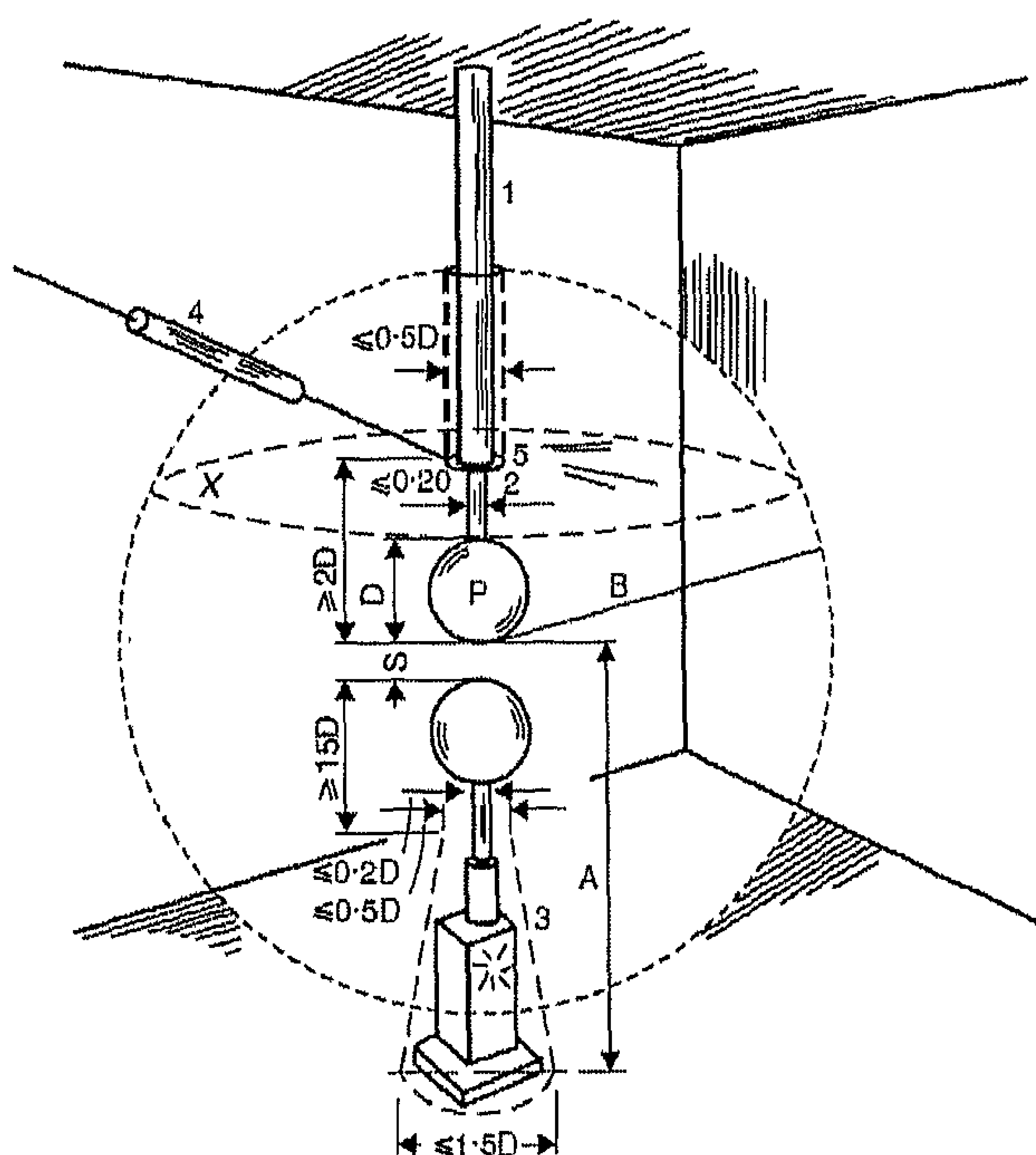
ولكي نتجنب تفريغات الكورونا، فإن السيقان الداعمة للكرات يجب أن تخلو من الحواف الحادة والأركان. مسافة نقط الشرر من أي سطح موصل فيما عدا السيقان يجب أن تكون أكبر من:

$$\left(25+\frac{V}{3}\right)\text{ cm}$$

حيث V= جهد الذروة (kV) المراد قياسه.

وعند استخدام كرات كبيرة لقياس جهود منخفضة فإن المسافة المحددة لا يجب أن تقل عن قطر الكرة.

وقد لوحظ أن المعدن المصنوع منه الكرات لا يؤثر على دقة القياسات، وتنص BSS 358: 1939 على أن الكرات يمكن أن تصنع من النحاس الأصفر، البرونز، الصلب، النحاس، الألمنيوم أو سبائك خفيفة. المطلب الوحيد هو أن أسطح هذه الكرات يجب أن تكون نظيفة، خالية من الدهون، الرماد أو الرطوبة المترسبة. وأيضاً يجب أن تحفظ الثغرة بين الكرات خالية من جسيمات التراب الهائمة، الألياف، ...إلخ.



الشكل 10.2: ثغرة كرات رأسية (كرات كبيرة)

الجدول 10.1: ارتفاع نقطة شرر كرة الجهد العالي فوق مستوى الأرض المكافئ. S= مسافة نقطة الشرر

قطر الكرة	$S < 0.5D$		$S > 0.5D$	
D	أقصى ارتفاع	أدنى ارتفاع	أقصى ارتفاع	أدنى ارتفاع
حتى 25 cm	$7D$	$10S$	$7D$	$5D$
50 cm	$6D$	$8S$	$6D$	$4D$
75 cm	$6D$	$8S$	$6D$	$4D$
100 cm	$5D$	$7S$	$5D$	$3.5D$
150 cm	$4D$	$6S$	$4D$	$3D$
	$4D$	$6S$	$4D$	$3D$

ولاختبارات تردد القدرة، يجب توصيل مقاومة واقية قيمتها $1\ \Omega/V$ فيما بين الكرات وجهاز الاختبار للحد من تيار التفرغ ولمنع ذبذبات التردد العالي في الدائرة والتي يمكن أن تؤدي إلى تنقير زائد في الكرات. وبالنسبة للترددات الأعلى، سيزداد هبوط الجهد ومن الضروري

أن يكون لدينا قيمة أصغر من المقاومة. وبالنسبة للجهد النبضي فإن المقاومات الوقائية لا تكون مطلوبة. إذا تحققت شروط الكرات وملحقاتها كما هو مذكور سابقاً، فإن الكرات ستصدر الشرر عند جهد الذروة الذي سيكون قريباً من القيمة الاسمية الموضحة في الجدول 10.2. قيم المعايرة هذه مرتبطة بدرجة حرارة 20°C وضغط 760 mmHg . وبالنسبة للجهود a.c والنبضية، تعتبر الجداول دقيقة في حدود ±3% لأطوال ثغرة حتى $0.5D$. ولا تسري الجداول لأطوال ثغرة أقل من $0.05D$ وجهود نبضية أقل من 10 kV . إذا كان طول الثغرة أكبر من $0.5D$، تكون النتائج أقل دقة وهي موضحة داخل أقواس.

الجدول 10.2: ثغرة كرة مع كرة واحدة مؤرضة. قيمة ذروة جهود التفريغ التمزيقي [50% للاختبارات النبضية] تسري للآتي: 1. الجهود المترددة، 2. الجهود d.c لكلا القطبيتين، 3. الجهود النبضية الصاعقة السلبية وتشغيل المفاتيح

تباعد ثغرة الكرة (mm)	ذروة الجهد (kV) قطر الكرة (cm)						
	12.5	25	50	75	100	150	200
10	31.7						
20	59.0						
30	85	86					
40	108	112					
50	129	137	138	138	138	138	
75	167	195	202	203	203	203	203
100	(195)	244	263	265	266	266	266
125	(214)	282	320	327	330	330	330
150		(314)	373	387	390	390	390
175		(342)	420	443	443	450	450
200		(366)	460	492	510	510	510
250		(400)	530	585	615	630	630
300			(585)	665	710	745	750
350			(630)	735	800	850	855
400			(670)	(800)	875	955	975
450			(700)	(850)	945	1050	1080

تباعد ثغرة الكرة (mm)	ذروة الجهد (kV) قطر الكرة (cm)						
	12.5	25	50	75	100	150	200
500			(730)	(895)	1010	1130	1180
600				(970)	(1110)	1280	1340
700				(1025)	(1200)	1390	1480
800					(1260)	1490	1600
900					(1320)	1580	1720
1000					(1360)	1660	1840
1100						1730	1940
1200						1800	2020
1300						1870	2100
1400						1920	2180
1500						1960	2250
1600							2320
1700							2370
1800							2410
1900							2460
2000							2490

بسبب التراب والألياف المتواجدة في الهواء، فإن قياس الجهود d.c عامة تتعرض إلى أخطاء كبيرة. وهنا تكون الدقة في حدود ±5% بشرط أن يكون التباعد أقل من $0.4D$ والتراب الزائد غير موجود.

خطوات قياس الجهد العالي باستخدام ثغرات كرة تعتمد على نوع الجهد المراد قياسه. ولقياس جهد a.c أو d.c، نبدأ مع التأثير بجهد منخفض حتى لا يحدث قفزة شرر لعابرات تشغيل المفاتيح عبر ثغرة الكرة ثم بعد ذلك يزداد الجهد تدريجياً حتى تنهار الثغرة. وكبديل يؤثر الجهد عبر ثغرة كبيرة نسبياً ثم يخفض التباعد تدريجياً حتى تنهار الثغرة. ومقابل هذه الثغرة فإن قيمة جهد الذروة يمكن قراءته من جدول المعايرة. ومع ذلك، نذكر بأن قيم جداول المعايرة تقابل ضغط 760 mmHg ودرجة حرارة 20°C . وأي انحراف عن القيم، يجب استخدام معامل تصحيح للحصول على القيمة الصحيحة للجهد المقاس.

الجدول 10.3: ثغرة كرة مع كرة واحدة مؤرضة. قيم الذروة لجهود التفريغ التمزيقية [قيم 50%]. الصواعق الموجبة والجهود النبضية لتشغيل المفاتيح

تباعد ثغرة الكرة (mm)	ذروة الجهد (kV) قطر الكرة (cm)						
	12.5	25	50	75	100	150	200
10	31.7						
20	59	59					
30	85.5	86					
40	110	112					
50	134	138	138	138	138	138	138
75	(181)	199	203	202	203	203	203
100	(215)	254	263	265	266	266	266
125	(239)	299	323	327	330	330	330
150		(337)	380	387	390	390	390
175		(368)	432	447	450	450	450
200		(395)	480	505	510	510	510
250		(433)	555	605	620	630	630
300			(620)	695	725	745	760
350			(670)	770	815	858	820
400			(715)	(835)	900	965	980
450			(745)	(890)	980	1060	1090
500			(775)	(940)	1040	1150	1190
600				(1020)	(1150)	1310	1380
700				(1070)	(1240)	(1430)	1550
750				(1090)	(1280)	(1480)	1620
800					(1310)	(1530)	1690
900					(1370)	(1630)	(1820)
1000					(1410)	(1720)	1930
1100						(1790)	(2030)
1200						(1860)	(2120)

ولقياس جهود تفريغ تمزيقي نبضي 50%، فإن تباعد ثغرة الكرة أو جهد شحن المولد النبضي يضبط في خطوات 3% من الجهد التمزيقي المتوقع. ويجب إجراء ستة تأثيرات للنبض عند كل خطوة والفترة بين تأثيرين تكون .5 sec . القيمة التي تعطي احتمال 50% للتفريغ التمزيقي يفضل الحصول عليها بواسطة الاستكمال interpolation بين ثغرتين على الأقل أو ضبط جهد، أحدهما يؤدي إلى تفريغين تمزيقيين أو أقل من ستة تأثيرات والأخرى في أربعة تفريغات تمزيقية أو أكثر من ستة تأثيرات مرة ثانية.

وهناك طريقة أخرى، بسيطة وأقل دقة، هي أن نضبط الوضع بحيث نحصل على أربعة إلى ستة تفريغات تمزيقية في سلسلة من عشرة تأثيرات متتالية.

جهد الانهيار لثغرة كرة يزداد مع الزيادة في الضغط وينخفض مع الزيادة في درجة الحرارة. قيمة الجهود التمزيقية كما هي معطاة في الجداول 10.2، 10.3 تقابل ضغط 760 mmHg ودرجة حرارة 20°C . وللتغيرات الصغيرة في درجات الحرارة والضغط، يكون الجهد التمزيقي متناسباً مع كثافة الهواء النسبية. وتعطى كثافة الهواء النسبية δ كالآتي:

$$\delta = \frac{293b}{760\,(273+t)}$$

حيث b، t = الظروف الجوية [الضغط بـ mmHg، ودرجة الحرارة °C على الترتيب] أثناء القياس.

ويعطى الجهد التمزيقي V بالآتي:

$$V = K_d V_0$$

حيث V_0= الجهد التمزيقي كما هو معطى في الجدولين 10.2، 10.3.

K_d= معامل تصحيح معطى في الجدول 10.4 وهو دالة غير خطية في δ.

١٠-٣ ثغرات الشرر منتظمة المجال Uniform Field Spark Gaps

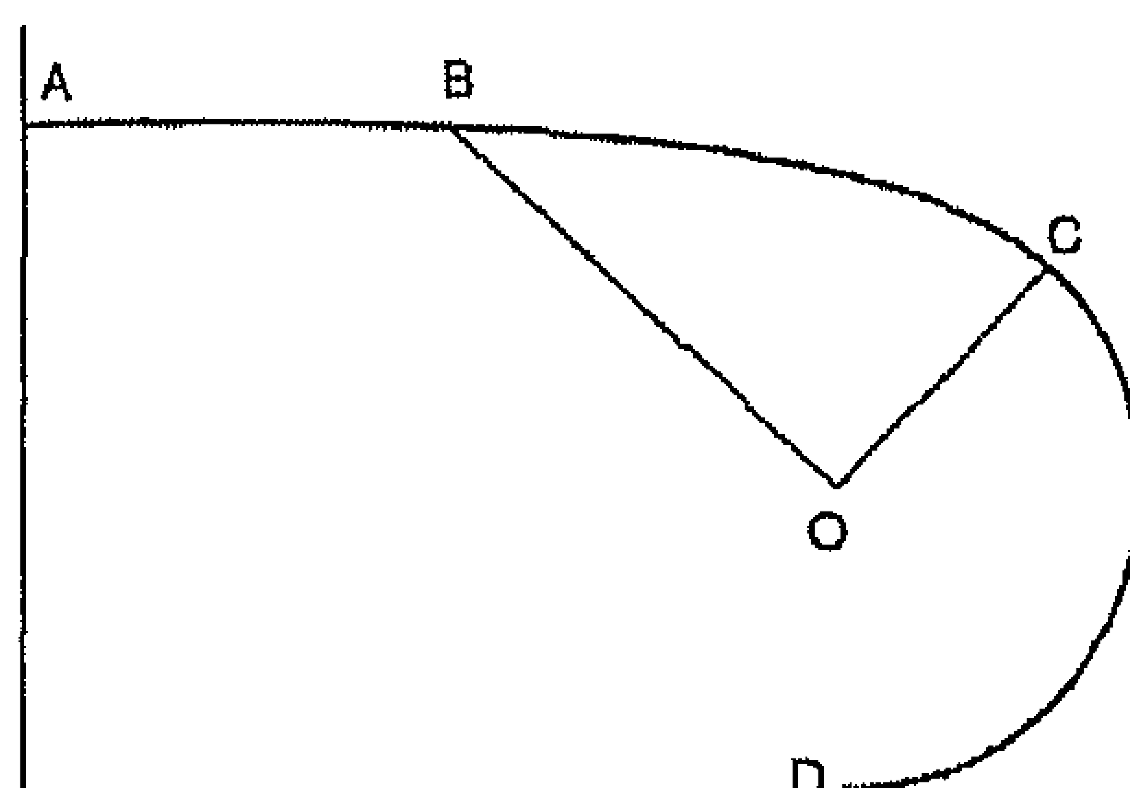
اقترح بروس Bruce استخدام ثغرات الشرر منتظمة المجال لقياس الجهود a.c، d.c والنبضية. وهذه الثغرات تعطي دقة في حدود 0.2% لقياسات الجهد a.c. ويبين الشكل 10.3 نصف كنتور لإلكترود واحد له أسطح شرر مستوية مع حواف ذات انحناء متزايد.

الجزء AB يكون مفلطحاً [مسطح]، القطر الإجمالي للجزء المسطح يكون أكبر من أقصى تباعد بين الإلكترودات. الجزء BC يتكون من منحنى جيبي يرتكز على المحور OB، OC

ويعطى بـ$XY = CO\,sin(BX/BO \cdot \pi/2)$. الجزء CD يكون قوس من دائرة مركزها عند O.

الجدول 10.4: معامل تصحيح كثافة الهواء K_d

δ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0	1.05	1.10
K_d	0.72	0.76	0.81	0.86	0.90	0.95	1.0	1.05	1.09



الشكل 10.3: نصف كنتور لثغرة شرر منتظمة

وقد بين بروس أن جهد الانهيار V لثغرة ذات طول S cm في الهواء عند 20°C، ضغط 760 mmHg يكون 0.2% من القيمة المعاطة بواسطة العلاقة التجريبية:

$$V = 24.22S + 6.08\sqrt{S}$$

ولذلك، فهذه المعادلة تحل محل الجدولين 10.2، 10.3 الضرورية لثغرات الكرة. وهذه ميزة كبيرة، أي، إذا كان التباعد بين الكرات للانهيار معروف فإن جهد الانهيار يمكن حسابه.

المميزات الأخرى لثغرات شرر المجال المنتظم هي:

١. لا تأثير للأهداف المؤرضة القريبة.

٢. لا تأثير للقطبية.

ومع ذلك فإن العيوب هي:

١. مطلوب تشطيب ميكانيكي عالي الدقة للإلكترودات.

٢. مطلوب محاذاة متوازية دقيقة للإلكترودين.

٣. تأثير الأتربة يؤدي إلى انهيار خاطئ للثغرة. وهذا خطير جداً في هذه الثغرات مقارنة مع ثغرات الكرة حيث إن مساحات الإلكترود عالية الإجهاد تصبح أكبر.

لذلك، فإن ثغرة المجال المنتظم لا تستخدم عادة لقياسات الجهد.

١٠-٤ ثغرات القضيب Rod Gaps

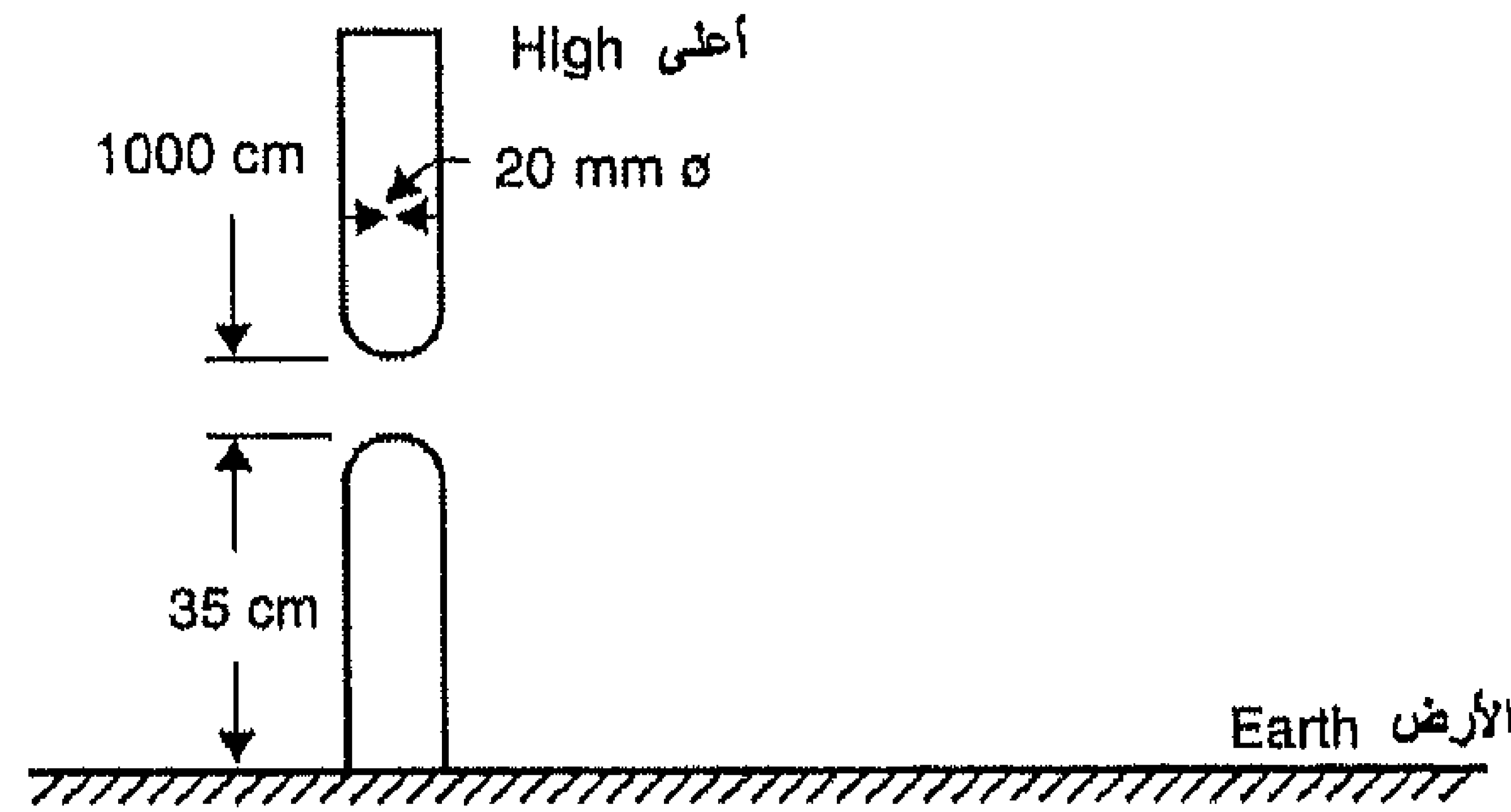
يمكن استخدام ثغرة القضيب لقياس قيمة الذروة لتردد القدرة والجهود النبضية. وعادة تتكون الثغرة من إلكترودات قضيبين مربعين 1.27 cm في المقطع عند نهايتهم ومركبين على قواعد عازلة بحيث يكون طول القضيب مساوي أو أكبر من نصف تباعد الثغرة الذي يعلو الحافة الداخلية للدعامة. جهود الانهيار كما وجدت في المواصفات القياسية الأمريكية لأطوال الثغرة المختلفة عند 25°C، وضغط 760 mmHg ومع ضغط بخار الماء 15.5 mmHg موضحة في الجدول 10.5.

الجدول 10.5 : جهد الانهيار طبقاً للمواصفات القياسية الأمريكية

طول الثغرة (cm)	جهد الانهيار (kV) ذروة	طول الثغرة (cm)	جهد الانهيار (kV) ذروة
2	26	80	435
4	47	90	488
6	62	100	537
8	72	120	642
10	81	140	744
15	102	160	847
20	124	180	950
25	147	200	1054
30	172	220	1160
35	198		
40	225		
50	278		
60	332		
70	382		

جهد الانهيار في ثغرة قضيب تزيد كثيراً أو قليلاً خطياً مع زيادة كثافة الهواء النسبية عبر التغيرات العادية في الضغط الجوي. أيضاً، يزداد جهد الانهيار مع زيادة الرطوبة النسبية، وتؤخذ الرطوبة القياسية كـ 15.5 mmHg.

وبسبب التغير الكبير في جهد الانهيار لنفس التباعد وعدم التأكد المرتبط مع تأثير الرطوبة، فإن ثغرات القضيب لا تستخدم كثيراً لقياس الجهود النبضية أو a.c. ومع ذلك، فقد أوضحت الأبحاث الحديثة أن هذه القضبان يمكن أن تستخدم لقياس d.c بشرط توفر ضوابط معينة تتعلق بأشكال الإلكترودات، ويتكون نظام قياس d.c من قضيبين أطرافها نصف كروية الشكل ذات قطر حوالي 20 mm كما هو مبين في الشكل 10.4.



الشكل 10.4: نظام الإلكترود لثغرة القضيب لقياس HVDC

الإلكترود المؤرض يجب أن يكون طويل بحيث يكفي لبدء تدفقات انهيار موجبة إذا كان قضيب الجهد العالي هو الكاثود. ومع هذا النظام، سيبدأ دائماً جهد الانهيار بواسطة تدفقات موجبة لكلاً من القطبيتين وبذلك يعطي تغير صغير جداً ويصبح معتمداً على الرطوبة. فيما عدا الجهود المنخفضة [أقل من 120 kV] –حيث تكون الدقة منخفضة– يمكن أن يعطى جهد الانهيار بواسطة العلاقة التجريبية:

$$V = \delta(A + BS)4\sqrt{5.1\times10^{-2}(h + 8.65)}\ \text{kV}$$

حيث $h =$ الرطوبة المطلقة $\left(\text{gm/m}^3\right)$ وتتغير بين gm/m^3 (4–20) في العلاقة السابقة. جهد الانهيار يكون مرتبطاً خطياً مع تباعد الثغرة وميل العلاقة $B = 5.1\ \text{kV/cm}$ وقد وجد أنه يكون مستقلاً عن قطبية الجهد. ومع ذلك فالثابت A يكون اعتماد القطبية وله قيم:

للقطبية الموجبة: $A = 20\ \text{kV}$.

للقطبية السالبة: $A = 15\ \text{kV}$.

دقة العلاقة السابقة أفضل من ±2% –ولذلك– تعطي دقة أفضل حتى مقارنة مع ثغرة الكرة.

١٠-٥ الفولتميتر الكهروستاتيكي Electrostatic Voltmeter

المجال الكهربي طبقاً لكولوم هو مجال من القوى. وينـتج المجـال الكهربـي بواسـطة جهـد و– لذلك– إذا أمكن قياس قوة المجال، فإن الجهد يمكن أن يقاس أيضاً. فعنـدما يـؤثر جهـد علـى نظام إلكترود متوازي الألواح، ينشأ مجال كهربي بين الألواح. ومن الممكن الحصول علـى مجـال كهربي منتظم بين الألواح بنظام مناسب من الألواح. ويكون المجال منتظم، عمودي على الألـواح وموجه إلى اتجاه اللـوح الـسالب. فـإذا كانـت A هـي مـساحة اللـوح، E هـي شـدة المجـال الكهربي بين الألواح، ε هـي منفذيـة الوسـط بـين الألـواح، نعـرف أن كثافـة الطاقـة للمجـال الكهربي بين الألواح تعطى كالآتي:

$$W_d = \frac{1}{2}\varepsilon E^2$$

ونفترض حجم تفاضلي بين الألواح ومـوازي للألـواح مـع مـساحة A وسمـك dx، يكـون محتوى الطاقة في هذا الحجم التفاضلي $A\,dx$ هو:

$$dW = W_d\, A\, dx = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 A\, dx$$

والآن تكون القوة F بين الألواح معرفة بمشتقة الطاقة الكهربية المخزنة بطول اتجاه المجال أي:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 A$$

والآن حيث $E = V/d$ حيث V هو الجهد المـراد قياسـه، d هـي مـسافة الفـصل بـين الألواح. لذلك، فإن التعبير عن القوة F يكون:

$$F = \frac{1}{2}\varepsilon \frac{V^2 A}{d^2}$$

وحيث إن اللوحين يكونا ذات شحنات متعاكسة، يوجد دائماً قـوة تجـاذب بـين الألـواح. فإذا كان الجهد معتمد على الزمن، فإن القوة المتولدة تكون معتمـدة علـى الـزمن أيـضاً. وفي هـذه الحالة فإن القيمة المتوسطة للقوة تستخدم لقياس الجهد. وهكذا:

$$F = \frac{1}{T}\int_0^T F(t)dt = \frac{1}{T}\int \frac{1}{2}\varepsilon \frac{V^2(t)}{d^2} A\, dt$$

$$= \frac{1}{2}\frac{\varepsilon A}{d^2}\cdot\frac{1}{T}\int V^2(t)dt = \frac{1}{2}\varepsilon A\frac{V_{r.m.s}^2}{d^2}$$

الفولتيمترات الكهروستاتيكية تقيس القوة على أساس المعادلات السابقة وترتب بحيث يكون أحد الألواح ثابتاً بينما الآخر مسموح له بالحركة. وبذلك يضطرب المجال الكهربي. ولهذا السبب، يسمح لإلكترود متحرك بالحركة في حدود ليس أكثر من كسر من المليمتر حتى للجهود العالية حتى يكون التغير في المجال الكهربي صغيراً لدرجة الإهمال. وحيث إن القوة تكون متناسبة مع مربع $V_{r.m.s}$، فإن جهاز القياس يمكن أن يستخدم لقياس كل من الجهد a.c، d.c.

القوة المتولدة بين الألواح تكون كافية لأن تستخدم لقياس الجهد. وقد تم تطوير تصميمات مختلفة للفولتميتر تختلف في تركيب نظام الإلكترود وفي استخدام طرق مختلفة من قوى الاستعادة المطلوبة لتوازن جذب القوة الكهروستاتيكية. وبعض هذه الطرق هي:

١. تعليق إلكترود متحرك على ذراع واحد من ميزان.

٢. تعليق إلكترود متحرك على زنبرك [سوستة].

٣. تعليق بندولي للإلكترود المتحرك.

٤. تعليق التوائي للإلكترود المتحرك.

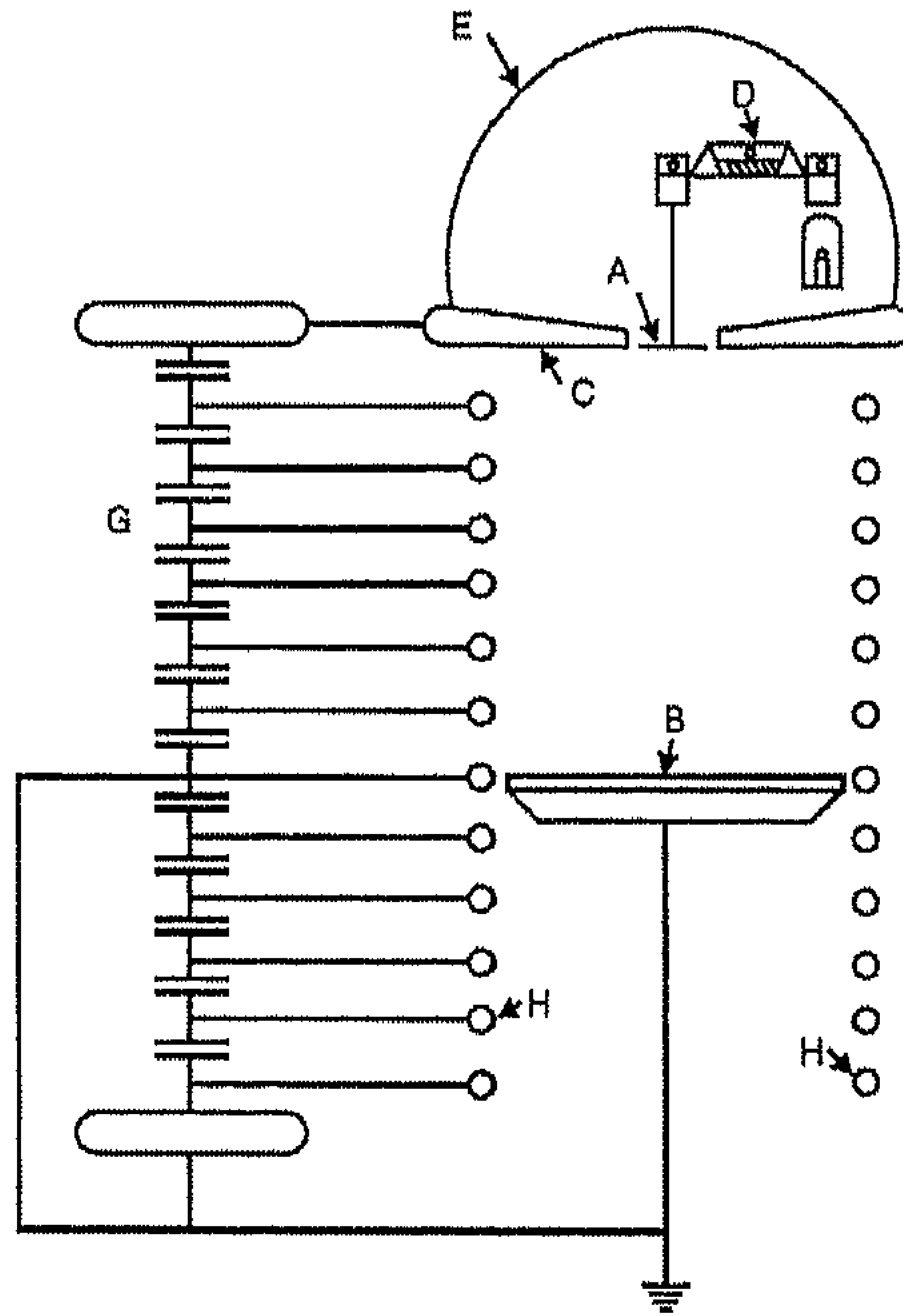
وعامة تنقل الحركة الصغيرة وتكبر بطرق كهربية أو ضوئية. وإذا قلت حركة الإلكترود وأمكن حساب توزيع المجال بالضبط، يمكن استخدام جهاز القياس [العداد] لقياس الجهد المطلق حيث المعايرة يمكن أن تنفذ بدلالة الكميات الأساسية للطول والقوة.

من علاقة القوة، من الواضح أنه لجهد معطى مراد قياسه، كلما زادت القوة، زادت الدقة المكن الحصول عليها مع جهاز القياس. ولكي نحقق قوة أعلى لجهد معطى، يجب أن تكون مساحة الألواح كبيرة، التباعد بين الألواح d يجب أن يكون صغيراً ويجب استخدام بعض الأوساط الكهربية العازلة بخلاف الهواء فيما بين الألواح. إذا كان مطلوب حفظ انتظام المجال الكهربي متزايداً في المساحة فإن A يجب أن تُصحب بزيادة في مساحة حلقة الحماية المحيطة وأيضاً اللوح المقابل –ولذلك– يمكن أن يصبح الإلكترود كبير بشكل غير ملائم وخاصة للجهود الأعلى. وبالمثل لا يمكن جعل طول الثغرة صغيراً جداً حيث إن ذلك محدود بمتانة الانهيار للوسط العازل بين الألواح. وإذا استخدم الهواء كوسط، فقد وجد أن تدريجات حتى 5 kV/cm تكون كافية. ولتدريجات أعلى يستخدم الفراغ أو غاز SF_6.

الميزة الأكبر للفولتميتر الكهروستاتيكي هو تأثير التحميل المنخفض جداً حيث يكون مطلوباً فقط ضبط المجالات الكهربية. وبسبب المقاومة العالية للوسط بين الألواح، فإن فقد القدرة الفعالة

يكون صغيراً لدرجة الإهمال. ولذلك، يكون تحميل مصدر الجهد، محدوداً فقط بقدرة المفاعلة المطلوبة لشحن سعة الجهاز التي تكون منخفضة وتصل إلى عدة بيكوفاراد لفولتميترات الجهد المنخفض.

وبذلك فإن نظام القياس لا يضع أي حد أعلى لتردد الإمداد المراد قياسه. ومع ذلك، حيث إن محاثة الحمل وسعة نظام القياس تشكل دائرة رنين توالي، فإنه يفرض حد على مدى التردد. وبالنسبة لفولتميترات المدى المنخفض فإن التردد الأعلى يكون محدداً عامة بعدة MHz قليلة.



الشكل 10.5: مخطط فولتميتر كهروستاتيكي

الشكل 10.5 يبين مخطط لنظام فولتميتر كهروستاتيكي مطلق. القبة النصف كروية E تحتوي على ميزان حساس D يقيس قوة التجاذب بين القرص المتحرك A المعلق من أحد أذرعه واللوح السفلي B. الإلكترود المتحرك A معلق مع خلوص 0.01 cm، في الفتحة المركزية في اللوح العلوي والتي تخدم كحلقة واقية C. قطر كل من الألواح هي 1 m . الضوء المنعكس من مرآة محمولة بواسطة ذراع الميزان تخدم لتكبير حركته ولتبين للمشغل عند مسافة آمنة حتى نصل إلى شرط التوازن. وعندما يكون التباعد بين الإلكترودين كبيراً [حوالي 100 cm

لجهد حوالي 300 kV] يحفظ انتظام المجال الكهربي بواسطة الحلقة الواقية C التي تحيط الفراغ بين الأقراص A ، B . وتحفظ الحلقات الواقية C عند جهد ثابت في الفراغ بواسطة مقسم سعة G يضمن توزيع جهد فراغي منتظم. وعندما تكون الجهود المقاسة في حدود (10–100) kV، تكون الدقة في حدود 0.01%.

وقد استخدم هويتر Hueter زوج من الكرات ذات قطر 100 cm لقياس الجهود العالية مستخدماً قوة الجذب الكهروستاتيكية بينهم. وقد رتبت الكرات مع محور رأسي وعند تباعد أكبر قليلاً من مسافة الشرر لقياس جهد خاص. كرة الجهد العالي العلوية تكون محملة على زنبرك ويُكبر تمدد الزنبرك الناشئ من القوة الكهروستاتية بواسطة نظام مقياس لمبة–مرآة. وقد تحقق مستوى دقة 0.5% بواسطة هذا النظام.

وتم تطوير فولتميترات كهروستاتية تستخدم غاز مضغوط كوسط عازل. وهنا بالنسبة لجهد معطى فإن طول الثغرة الأقصر يمكن من الحفاظ على الانتظام المطلوب للمجال مع إلكترودات ذات حجم أصغر ويكون النظام أكثر دمجاً.

وقد استخدم أحد هذه الفولتميترات الذي يستخدم غاز SF_6 يمكنه قياس جهود حتى 1000 kV ودقة في حدود 0.1%. إلكترود الجهد العالي والمستوى المؤرض يعطي مجال كهربي منتظم في حدود قطر قرص 5 cm موجود في مستوى واقي قطره 65 cm . ويستخدم نظام ميزان وزن ليسمح بكتلة خمد كبيرة. ويمكن أن يتغير طول الثغرة بين 2.5 cm، 5 cm، 10 cm وبسبب أقصى إجهاد كهربي عامل 100 kV/cm ، فإن آماد الجهد يمكن أن تختار لتكون 250 kV، 500 kV ، 1000 kV . مع تدرج 100 kV/cm ، وُجد أن القوة المتوسطة على القرص التي تساوي 0.8681 N تكافئ وزن 88.52 gm. وحُفظت تحركات القرص الصغير ما أمكن وفي حدود 1 µm بواسطة نظام ميزان الوزن.

وتستخدم الفولتميترات لقياس الجهود العالية a.c، d.c. قياس الجهود الأقل من 50 V تكون –مع ذلك– غير ممكنة، حيث تصبح القوى صغيرة جداً.

١٠-٦ الفولتميتر المُولِّد Generating Voltmeter

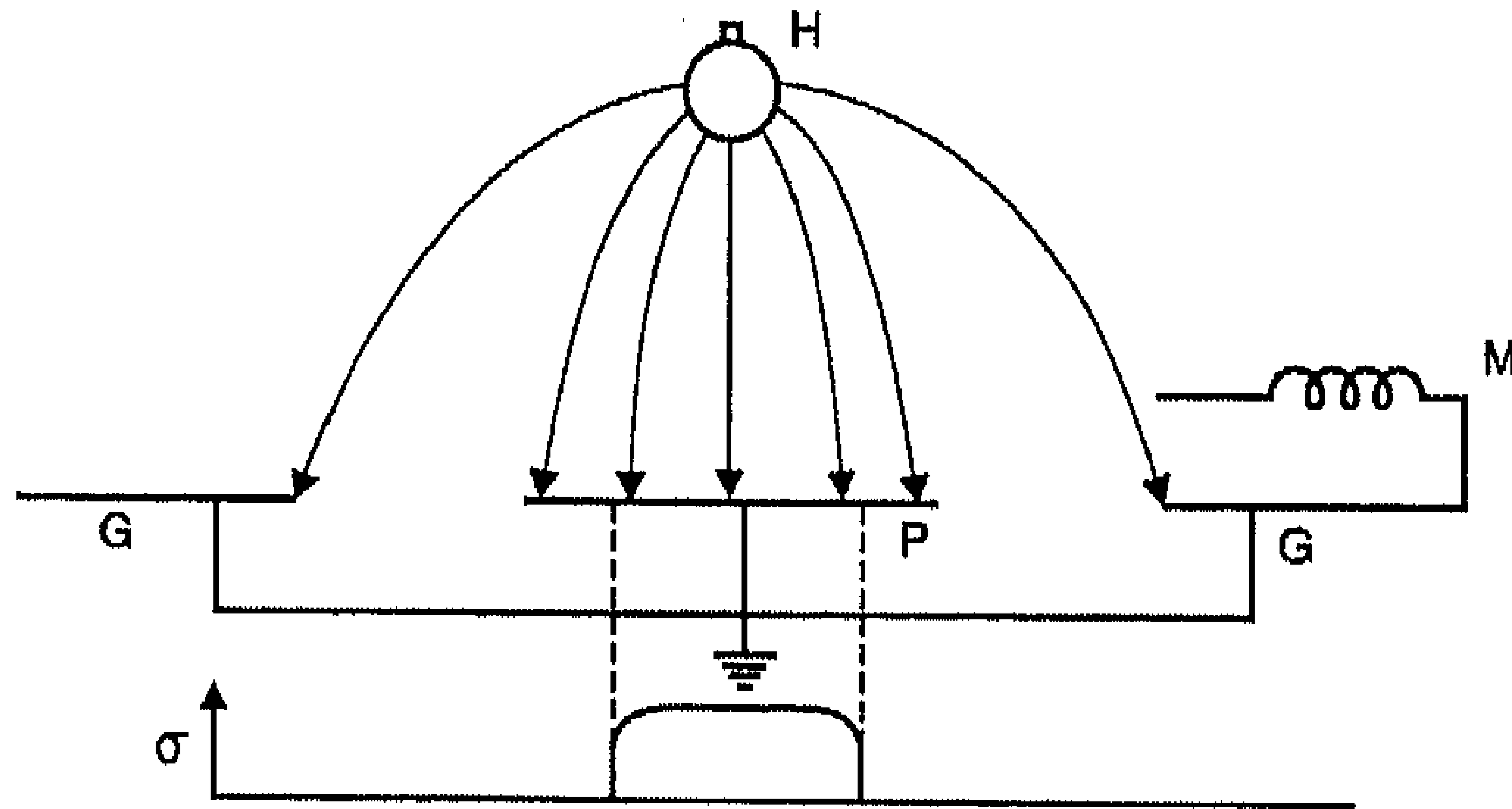
عندما لا يُسمح بتحميل المصدر أو عندما يجب تجنب التوصيل المباشر بمصدر الجهد العالي، نستخدم مبدأ التوليد لقياس الجهود العالية. الفولتميتر المولد هو مولد جهد كهروستاتيكي ذو مكثف متغير يولد تيار يتناسب مع الجهد المراد قياسه. مثل الفولتميتر الكهروستاتيكي يعطي

الفولتميتر المولد قياس خالي من الفقد للجهود d.c، a.c. ويدار الجهاز بواسطة محرك خارجي ثابت السرعة ولا يمتص قدرة أو طاقة من مصدر قياس الجهد. مبدأ التشغيل مشروح بمساعدة الشكل 10.6. حيث H هو إلكترود الجهد العالي والإلكترود المؤرض مقسم إلى إلكترود حساس أو إلكترود التقاط P، إلكترود واقي G وإلكترود متحرك M، وجميعهم عند نفس الجهد. يولد إلكترود الجهد العالي H مجال كهربي بين نفسه والإلكترودات P، G، M [خطوط المجال موضحة في الشكل 10.6]. كثافة المجال الكهربي σ موضحة أيضاً بالشكل 10.6. إذا كان الإلكترود M مثبتاً والجهد V متغيراً، فإن كثافة المجال σ ستتغير وبذلك سيمر تيار $i(t)$ بين P والأرض حيث:

$$i(t)=\frac{dq(t)}{dt}=\frac{d}{dt}\left[\int\sigma(a)da\right]$$

حيث $\sigma(a)$ = كثافة المجال الكهربي أو كثافة الشحنة عبر بعض المسارات ويفترض أنها ثابتة عبر مساحة تفاضلية da من إلكترود الالتقاط. في هذه الحالة تكون $\sigma(a)$ دالة في الزمن أيضاً.

$\int da$ = مساحة إلكترود الالتقاط P المعرض للمجال الكهربي.



الشكل 10.6: مبدأ الفولتميتر المولد

ومع ذلك، إذا كان الجهد V المراد قياسه ثابتاً [جهد d.c]، فإنه سيمر تيار $i(t)$ عندما يتحرك فقط أي أن $\sigma(a)$ الآن لن تكون دالة في الزمن ولكن الشحنة q تتغير لأن مساحة إلكترود الالتقاط المعرض للمجال الكهربي تتغير. ويعطى حينئذ التيار $i(t)$ بالآتي:

$$i(t)=\frac{d}{dt}\int_{A(t)}\sigma(a)da=\varepsilon\frac{d}{dt}\int_{A(t)}E(a)da$$

حيث $\sigma(a) = \varepsilon E(a)$

ε = منفذية الوسط بين إلكترود الجهد العالي والإلكترود المؤرض.

الحدود التكاملية تشير إلى أن المساحة المعرضة متغيرة الزمن.

إلكترود الجهد العالي والإلكترود المؤرض في الحقيقة تكون نظام سعة capacitance system. وتكون السعة –مع ذلك– دالة في الزمن حيث إن المساحة A تتغير مع الزمن و–لذلك– تعطى الشحنة $q(t)$ كالآتي:

$$q(t) = C(t)V(t)$$

و

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C(t)\frac{dV(t)}{dt} + V(t)\frac{dC(t)}{dt}$$

وبالنسبة للجهود d.c:

$$\frac{dV(t)}{dt} = 0$$

وبالتالي فإن:

$$i(t) = V\frac{dC(t)}{dt}$$

إذا تغيرت السعة C خطياً مع الزمن ووصلت إلى قيمة ذروتها C_m في زمن $T_c/2$ انخفضت إلى الصفر خطياً في زمن $T_c/2$، فإن السعة تعطى كالتالي:

$$C(t) = 2\frac{C_m}{T_c}t$$

وبالنسبة لسرعة ثابتة n rpm للمحرك المتزامن والذي هو متغير السعة، يعطى الزمن T_c بالآتي: $T_c = 60/n$.

لذلك فإن:

$$I = 2C_m V\frac{n}{60} = \frac{n}{30}C_m V$$

وإذا تغيرت السعة C جيبياً بين الحدود C_0، $(C_0 + C_m)$ فإن:

$$C = C_0 + C_m \sin \omega t$$

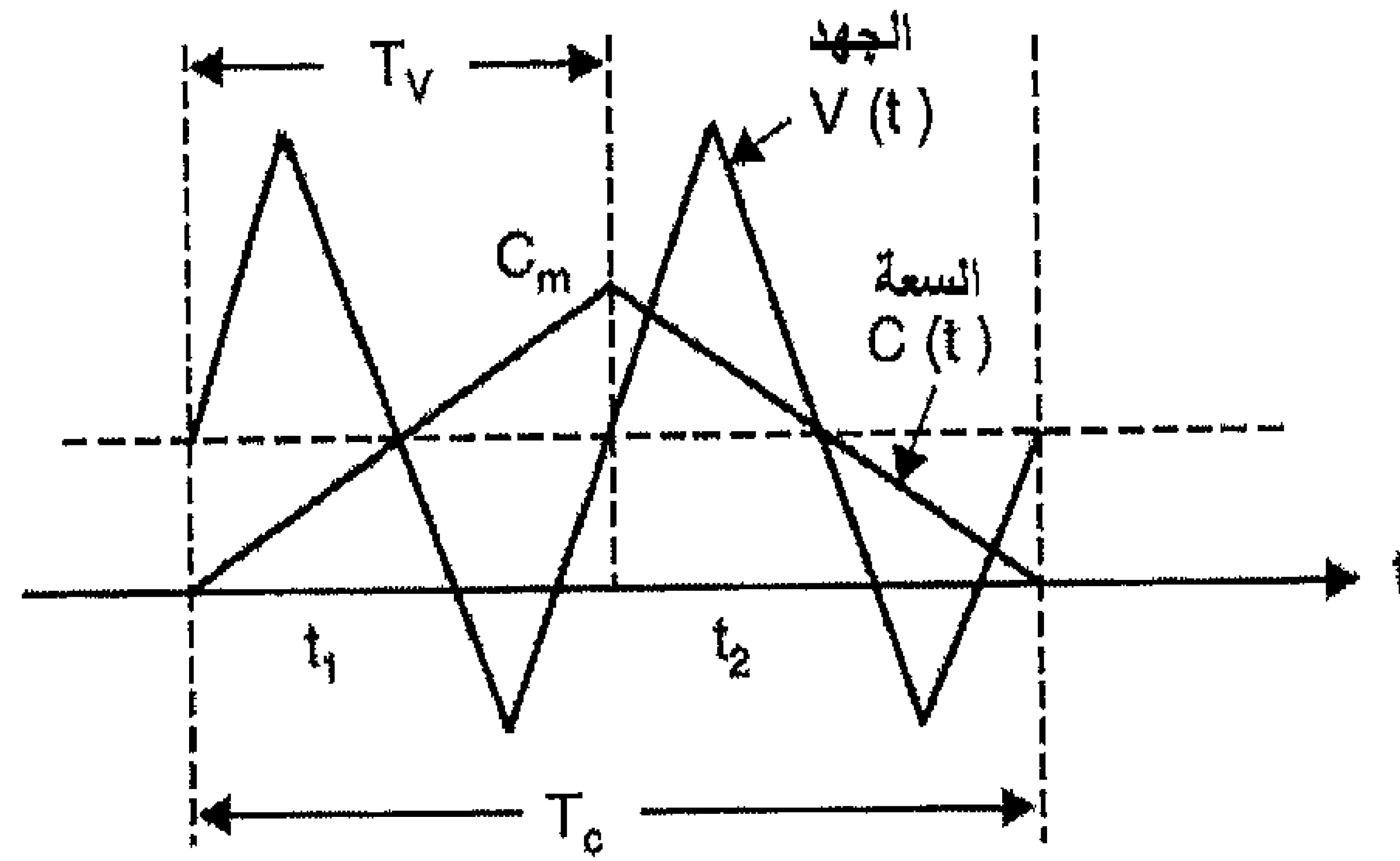
ويعطى التيار i كالآتي:

$$i(t) = i_m \cos \omega t$$

حيث $i_m = V C_m \omega$

ω = التردد الزاوي لتغير السعة.

إذا كانت ω ثابتة، فإن التيار المقاس يكون متناسباً مع الجهد المقاس. وعامة يُقوَّم التيار ويقاس بواسطة عداد متحرك الملف. ويمكن استخدام الفولتميترات المولدة لقياس الجهد a.c أيضاً بشرط أن يكون التردد الزاوي ω هو نفسه أو مساوياً لنصف التردد الزاوي للجهد المقاس. الشكل 10.7 يبين تغيرات C كدالة في الزمن مع جهد a.c، تردده ضعف تردد $C(t)$.



الشكل 10.7: تغير السعة والجهد بالنسبة للزمن

ويمكن أن ترى من الشكل 10.7 أنه مهما كانت علاقة الطور بين الجهد والسعة، عبر تغير دورة واحدة للجهد يكون الجهد هو نفسه [مثلاً $V(t_1)-V(t_2)$] ومعدل تغير السعة عبر الفترة T_v يساوي C_m/T_v. لذلك، فإن القيمة اللحظية للتيار $i(t)=C_m f_v V(t)$ حيث $f_v=1/T_v$ تردد الجهد. وحيث $f_v=2f_c$، $f_c=60/n$ نحصل على:

$$I(t)=\frac{n}{30}C_m V(t)$$

ويوضح الشكل 10.8 مخطط فولتميتر مولد يستخدم أرياش دوارة لتغيير السعة. إلكترود الجهد العالي موصل بإلكترود قرص D_3 يحفظ عند مسافة ثابتة على محور إلكترودات جهد منخفض أخرى D_2، D_1، D_0. ويدار العضو الدوار D_0 عند سرعة ثابتة بواسطة محرك متزامن عند سرعة مناسبة. أرياش العضو الدوار D_0 تسبب تغير دوري في السعة بين القرص المعزول D_2 والإلكترود عالي الجهد D_3. عدد وشكل الأرياش تصمم بحيث يتحقق تغير مناسب للسعة [جيبي أو خطي]. التيار a.c يُقوَّم ويقاس باستخدام أجهزة قياس متحركة الملف. إذا كان التيار صغيراً يمكن استخدام مكبر قبل قياس التيار.

الفولتميترات المولدة هي أجهزة قياس خطي قابلة للتطبيق عبر مدى واسع من الجهود.

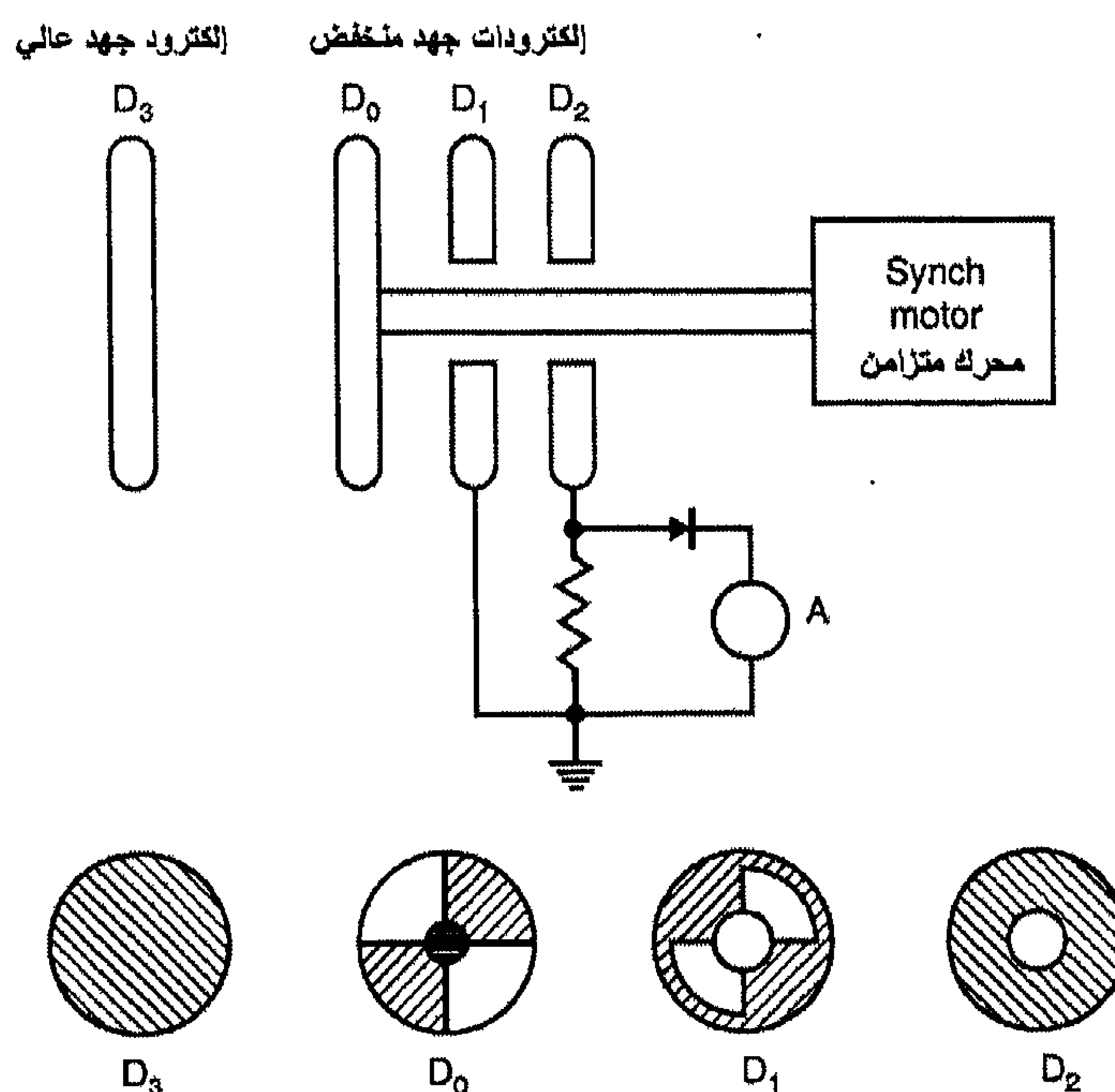
ويمكن زيادة الحساسية بزيادة مساحة إلكترود الالتقاط وباستخدام دوائر تكبير. والميزات الرئيسية للفولتميترات المولدة هي:

١. التدريج خطي ويمكن أن يُستخرج.

٢. تحميل المصدر يكون عملياً صفر.

٣. لا يوجد توصيل مباشر لإلكترود الجهد العالي.

ومع ذلك، فإنها تتطلب معايرة والتركيب مرهق.



الشكل 10.8: مخطط فولتميتر مولد

ويعتمد انهيار المواد العازلة على مقدار الجهد المؤثر وزمن تأثير الجهد. ومع ذلك، إذا كانت ذروة الجهد كبيرة مقارنة مع متانة انهيار المادة العازلة، فإن ظاهرة التفريغ التمزيقي تحدث عامة بواسطة ميل المجال الأقصى اللحظي الذي يجهد المادة. وهناك عدة طرق مختلفة يمكن أن تقيس جهود الذروة ولكن بسبب إجراءات المعايرة المعقدة والدقة المحدودة تجدد الدعوة إلى طرق أكثر ملائمة ودقة. ومن أكثر الطرق ملائمة بالرغم من انخفاض دقتها هي استخدام محول اختبار أثناء قياس جهد الخرج وتسجيله ونحصل على جهد الدخل بضرب

جهد الخرج في نسبة التحويل. ومع ذلك، هنا يعتمد جهد الخرج على تحميل اللفات الثانوية وتغير شكل الموجة يتسبب بواسطة معاوقات المحول ومن هنا فإن هذه الطريقة تكون غير مقبولة لقياسات جهد الذروة.

١٠-٧ طريقة شب-فورتسكيو لقياس قيمة الذروة للجهود a.c The Chubb-Fortescue Method

اقترح Chubb & Fortescue طريقة بسيطة ودقيقة لقياس قيمة الذروة للجهود a.c. وتتكون الدائرة الأساسية من مكثف قياس، عدد 2 دايود وأميتر مكامل للتيار [أميتر MC] كما هو مبين في الشكل 10.9(a).

تيار الإزاحة $i_c(t)$ الشكل 10.10 والمعطى بواسطة معدل تغير الشحنة وبالتالي الجهد $V(t)$ المراد قياسه يسريان خلال مكثف الجهد العالي C ويُقسما إلى مركبات موجبة وسالبة بواسطة الدايودات المتظاهرة D_1 ، D_2 back to back connected diodes. ويمكن إهمال هبوط الجهد عبر هذه الدايودات [1 V لدايودات Si] مقارنة مع الجهد المراد قياسه. جهاز القياس [الأميتر M.C.] موصل بأحد الأفرع. ويقرأ الأميتر القيمة المتوسطة للتيار.

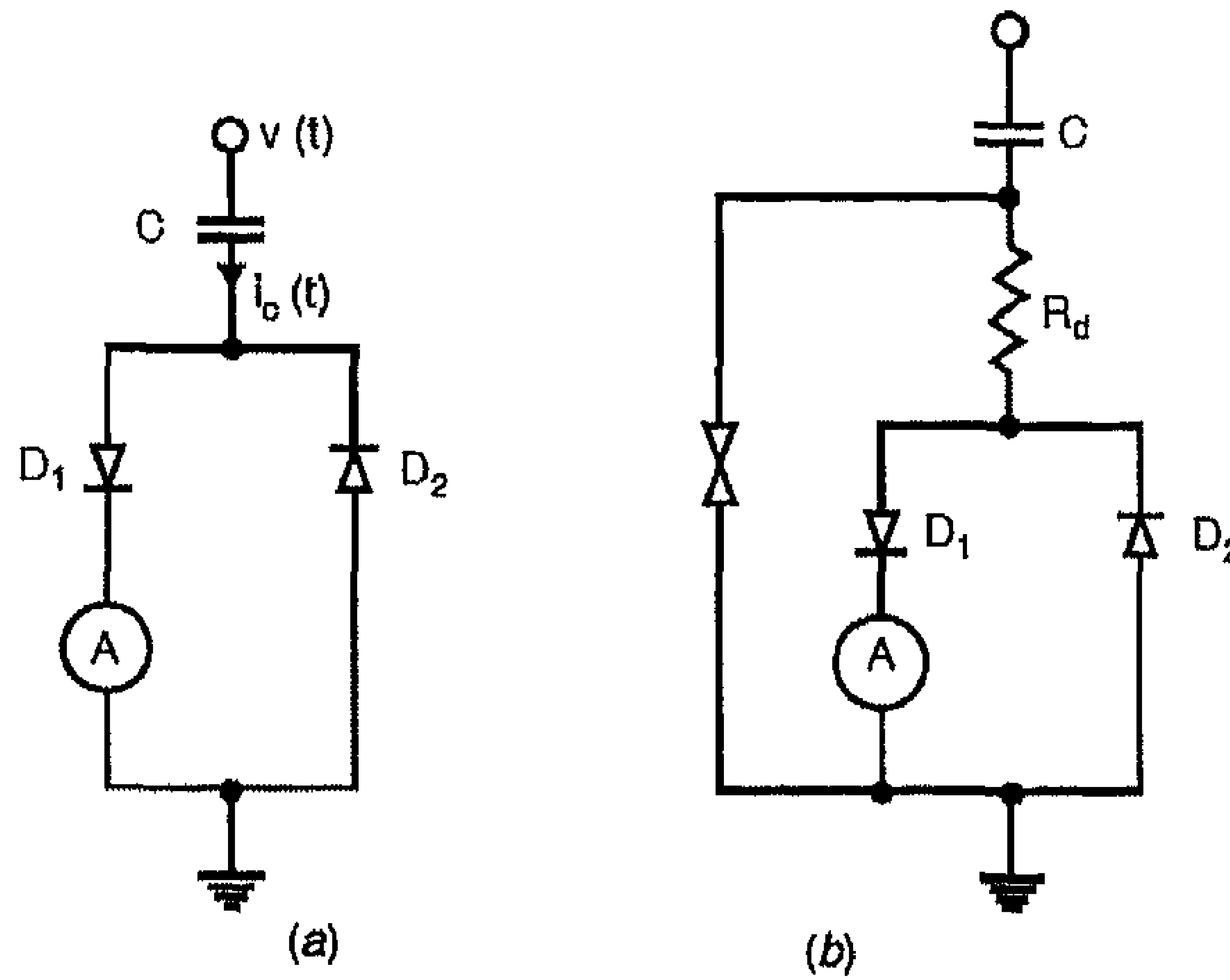
$$I = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} C\,\frac{dv(t)}{dt}\cdot dt = \frac{C}{T}\cdot 2V_m = 2V_m f\,C$$

أو

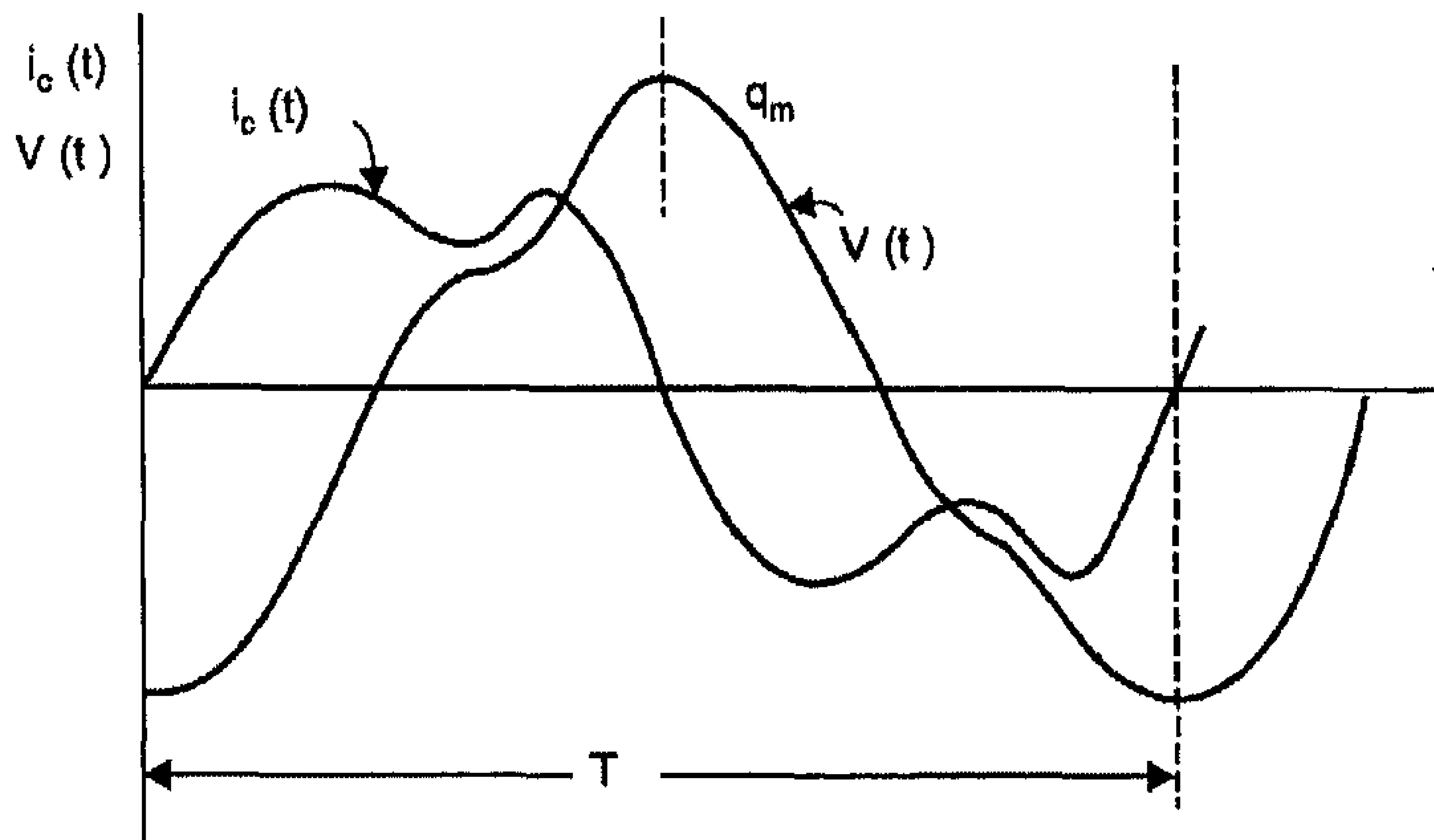
$$V_m = \frac{I}{2f\,C}$$

العلاقة السابقة تكون مماثلة لتلك المتحصل عليها في حالة الفولتميترات المولدة. وسنحصل على تيار متزايد إذا وصل التيار للصفر أكثر من مرة أثناء نصف دورة واحدة. وهذا يعني أن أشكال الموجة للجهد ستحتوي أكثر من نهاية عظمى واحدة لكل نصف دورة. جهود a.c القياسية للاختبار يجب أن لا تحتوي على أي توافقيات harmonics و–لذلك– يمكن تواجد جهود قصيرة وسريعة جداً تحدث بسبب التفريغات المبكرة الثقيلة، داخل دائرة الاختبار التي تستطيع تقديم أخطاء في القياس. ولمنع هذه المشكلة ينفذ ترشيح الجهد a.c بإدخال مقاومة تخميد بين المكثف ودائرة الدايودات الشكل 10.9(b).

أيضاً إذا استخدم مقوم موجة كاملة بدلاً من نصف الموجة كما هو مبين في الشكل 10.9، فإن العامل 2 في مقام المعادلة السابقة سيستبدل بـ 4 . وحيث إن التردد f، السعة C، والتيار I يمكن أن تقاس بدقة، فإن قياس الجهود a.c المتماثلة باستخدام طريقة شب وفورتسكيو تكون دقيقة ويمكن أن تستخدم لمعايرة أجهزة قياس الجهد العالي الأخرى.



الشكل 10.9 : طريقة شب-فورتسكيو. (a) الدائرة الأساسية؛ (b) الدائرة المُعدلة



الشكل 10.10 : تيار الإزاحة $i(t)$ والجهد المقاس $V(t)$

يوضح الشكل 10.11 دائرة رقمية digital لقياس جهد الذروة. وبخلاف للطريقة المنتهي مناقشتها الآن، فإن التيار المقوم لا يقاس مباشرة، وبدلاً من ذلك تشتق إشارة جهد أنالوج متناسبة والتي تتحول بعد ذلك إلى تردد متوسط متناسب باستخدام جهد إلى محول تردد [الصندوق A في الشكل 10.11]. نسبة التردد f_m/f تقاس بدائرة بوابة يتم التحكم بها بواسطة تردد قدرة a.c [تردد مصدر f] وعداد يفتح لعدد قابل للضبط من الفترات $\Delta t = p/f$. ويكون عدد الدورات n المحسوبة أثناء هذه الفترة هو:

$$n = \Delta t f_m = \frac{p}{f} f_m$$

حيث p = ثابت للجهاز.

والآن نفترض أن:

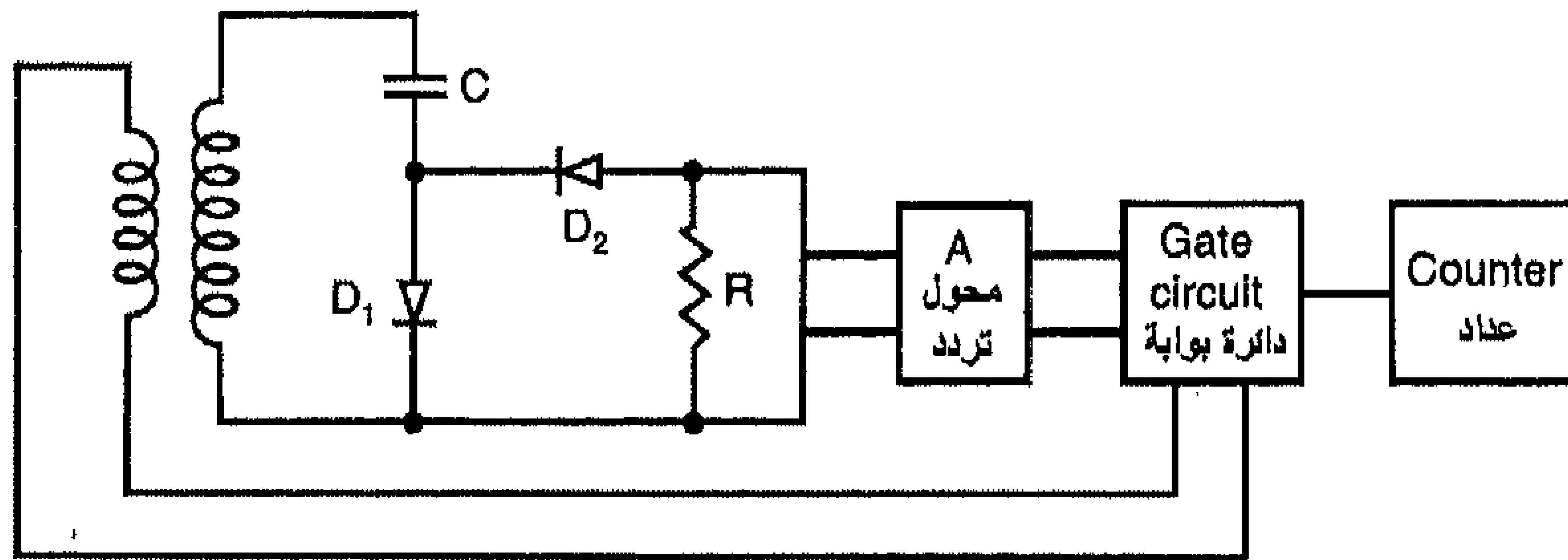
$$A = \frac{f_m}{R\, i_c} = \frac{f_m}{R\, 2V_m f\, C} = \frac{f_m}{f} \cdot \frac{1}{2RV_m C}$$

لذلك فإن:

$$n = p\, 2A\, RV_m C$$

حيث A = تمثل معامل تحول الجهد إلى التردد.

وبذلك يمكن معايرة المؤشر ليقرأ V_m مباشرة باختيار قيم مناسبة لـ A ، p ، R. ووجد أن الفولتميتر يعطي دقة 0.35%.



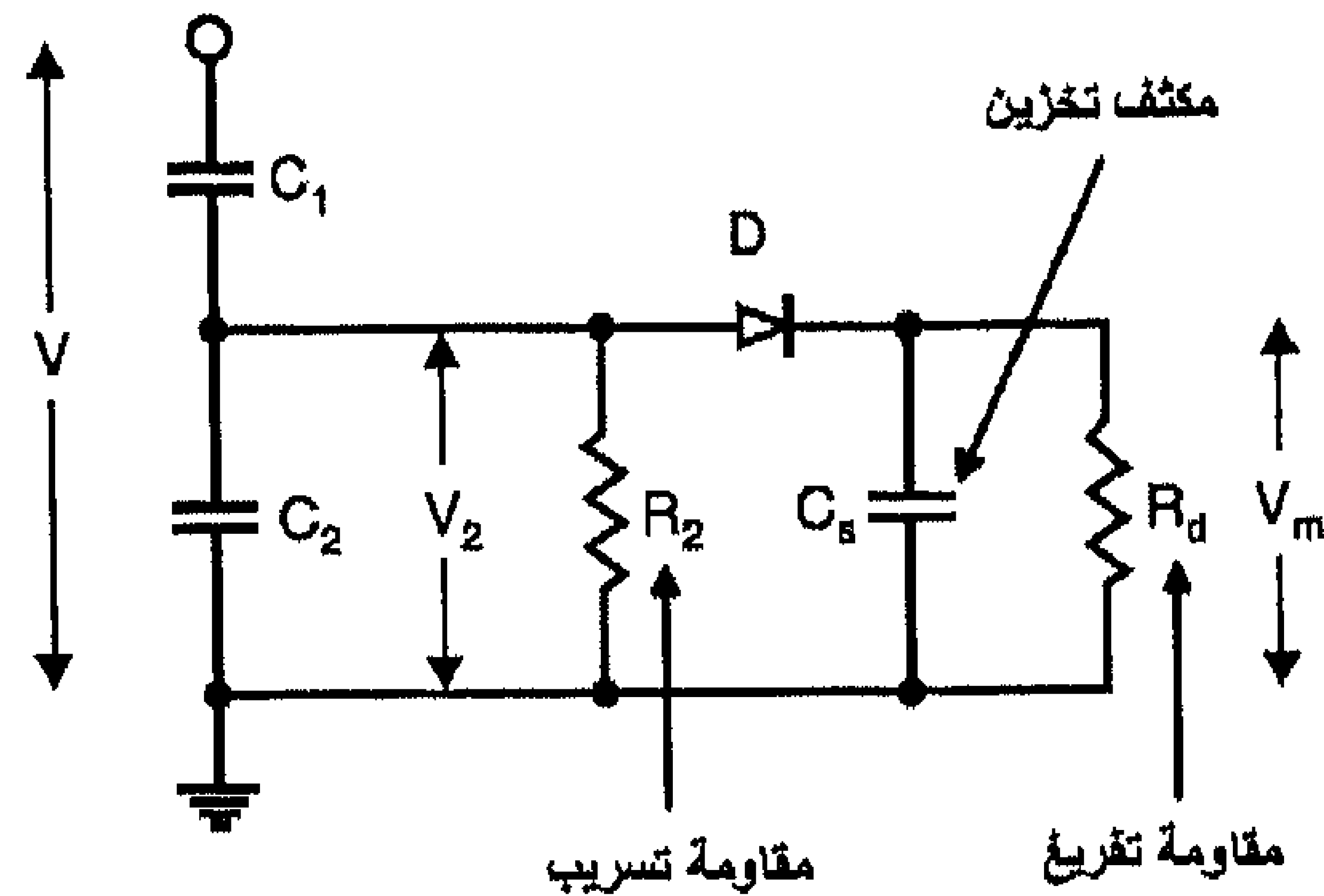
الشكل 10.11: فولتميتر ذروة رقمي

فولتميترات الذروة ذات مقسمات الجهد Peak Voltmeters with Potential Dividers

لا تستخدم هذه الأيام الدوائر السلبية غالباً لقياس قيمة الذروة للجهود a.c أو النبضية. تطور المكبرات المتكاملة كلياً والدوائر الإلكترونية الأخرى جعل من الممكن أخذ عينات من هذه الجهود وقياسها، ولذلك حلت محل الدوائر السلبية التقليدية. ومع ذلك، يجب أن نلاحظ أنه إذا صممت الدوائر السلبية بشكل مناسب، فإنها تعطي بساطة ودقة. والدوائر السلبية تكون رخيصة، يعول عليها ولها درجة عالية من التوافق الكهرومغنطيسي ومع ذلك -على النقيض- فإن معظم الأجهزة الإلكترونية المعقدة تكون مكلفة وتناسقها الكهرومغنطيسي منخفضاً.

الدوائر السلبية لا تستطيع قياس الجهود العالية مباشرة وتستخدم مقسمات جهد ومفضلة عن طراز السعة.

الشكل 10.12 يبين دائرة فولتميتر ذروة بسيطة، يتكون من مقسم جهد بالمكثف يخفض الجهد V المقاس إلى جهد منخفض V_m.



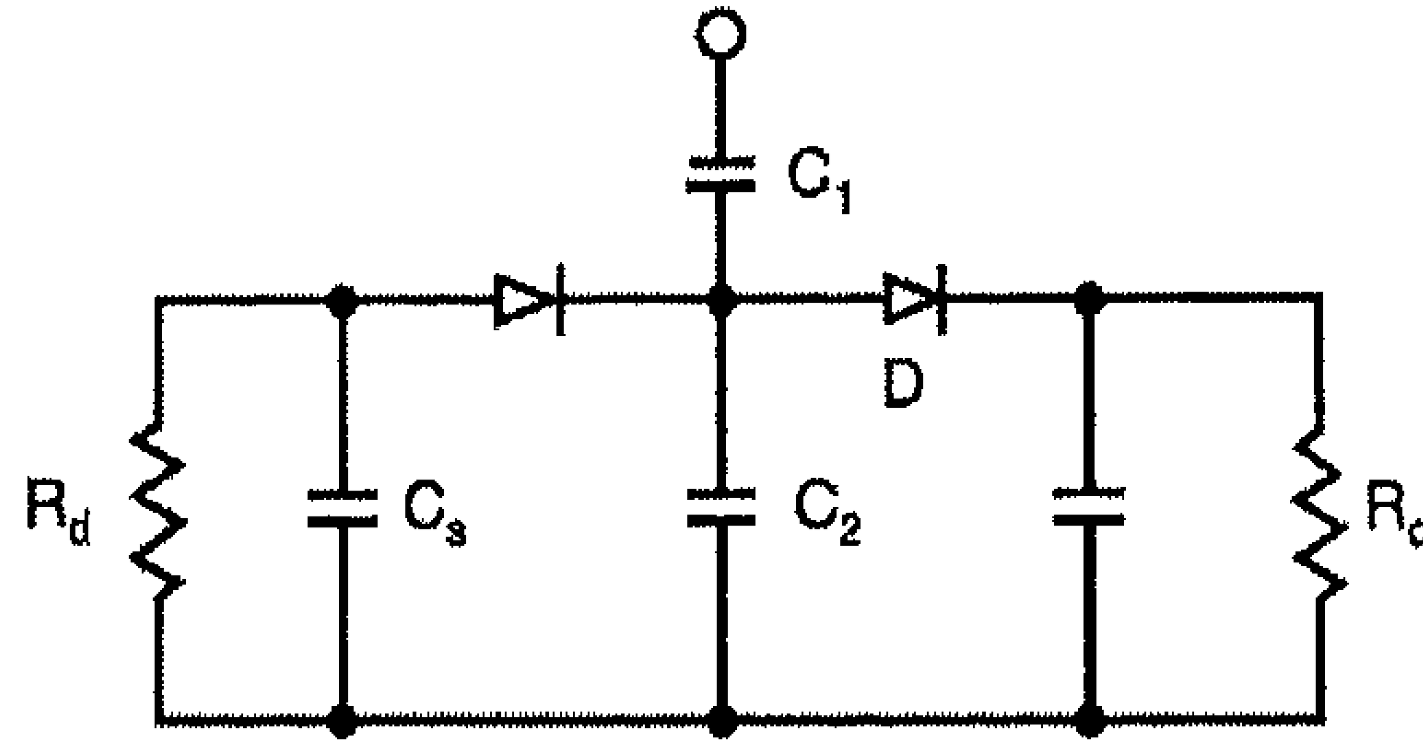
الشكل 10.12: دائرة فولتميتر ذروة بسيطة

نفترض أن R_2 ، R_d غير موجودتين وجهد الإمداد هو V. الجهد عبر مكثف التخزين C_s سيكون مساوياً لقيمة ذروة الجهد عبر C_2 بفرض أن هبوط الجهد عبر الدايود مهمل. وسوف يقاس الجهد بواسطة فولتميتر كهروستاتيكي أو أي فولتميتر آخر مناسب ذات معاوقة دخل عالية جداً. إذا كان التيار المعاكس خلال الدايود صغيراً جداً والثابت الزمني للتفريغ لمكثف التخزين كبيراً جداً، فإن مكثف التخزين لن يُفرغ لزمن طويل وبالتالي فسوف يمسك الجهد عند قيمته لزمن طويل. والآن إذا خُفض V، فإن الجهد V_2 ينخفض تناسبياً حيث الآن الجهد عبر C_2 يكون أصغر من الجهد عبر C_s المشحون مسبقاً –لذلك– فإن الدايود لا يوصل والجهد عبر C_s لا يتبع الجهد عبر C_2. وبالتالي، فإن مقاومة التفريغ R_d يجب أن تدخل إلى الدائرة حتى يتبع الجهد عبر C_s الجهد عبر C_2. ومن وجهة القياس مطلوب أن تكون الكمية المراد قياسها مبينة بواسطة جهاز القياس في خلال ثواني قليلة وبالتالي يتم اختيار R_d بحيث $R_d C_s = 1$ sec. ، ونتيجة لذلك، ستنشأ الأخطاء التالية: أولاً، مع توصيل R_d ، سينخفض الجهد عبر C_s باستمرار حتى عندما يحفظ جهد الدخل ثابتاً. أيضاً، سيفرغ المكثف C_2 وسيكتسب الجهد المتوسط لـ $V_2(t)$ مركبة d.c سالبة. من هنا يجب إدخال مقاومة تسريب R_2 على التوازي مع C_2 لتعادل تيارات التفريغ أحادية القطب هذه. الخطأ الثاني يناظر شكل الجهد عبر مكثف التخزين الذي يحتوي تموجات ripple ويرجع لتفريغ المكثف C_s. إذا كانت معاوقة الدخل لجهاز القياس كبيرة جداً، تكون التموجات مستقلة عن جهاز القياس المستخدم. ويكون الخطأ متناسباً تقريباً مع معامل التموج ويكون معتمداً على التردد حيث إن الثابت الزمني للتفريغ لا يمكن أن يتغير. إذا كان $R_d C_s = 1$ sec. يكون خطأ

التفريغ حوالي 1% لـ 50 Hz، 0.33% لـ 150 Hz . المصدر الثالث للأخطاء يكون مرتبطاً بخطأ التفريغ هذا. فأثناء زمن توصيل [عندما يكون الجهد عبر C_s أقل منه عبر C_2 بسبب تفريغ C_s خلال R_d] الدايود يكون مكثف التخزين C_s أعيد شحنه إلى قيمة الذروة وهكذا يصبح C_s على التوازي مع C_2. إذا كان خطأ التفريغ هو e_d فإن خطأ إعادة الشحن e_r يعطى كالتالي:

$$e_r = 2e_d \frac{C_s}{C_1 + C_2 + C_s}$$

ومن ذلك فإن C_s يجب أن يكون صغيراً مقارنة بـ C_2 ليخفض خطأ إعادة الشحن e_r.



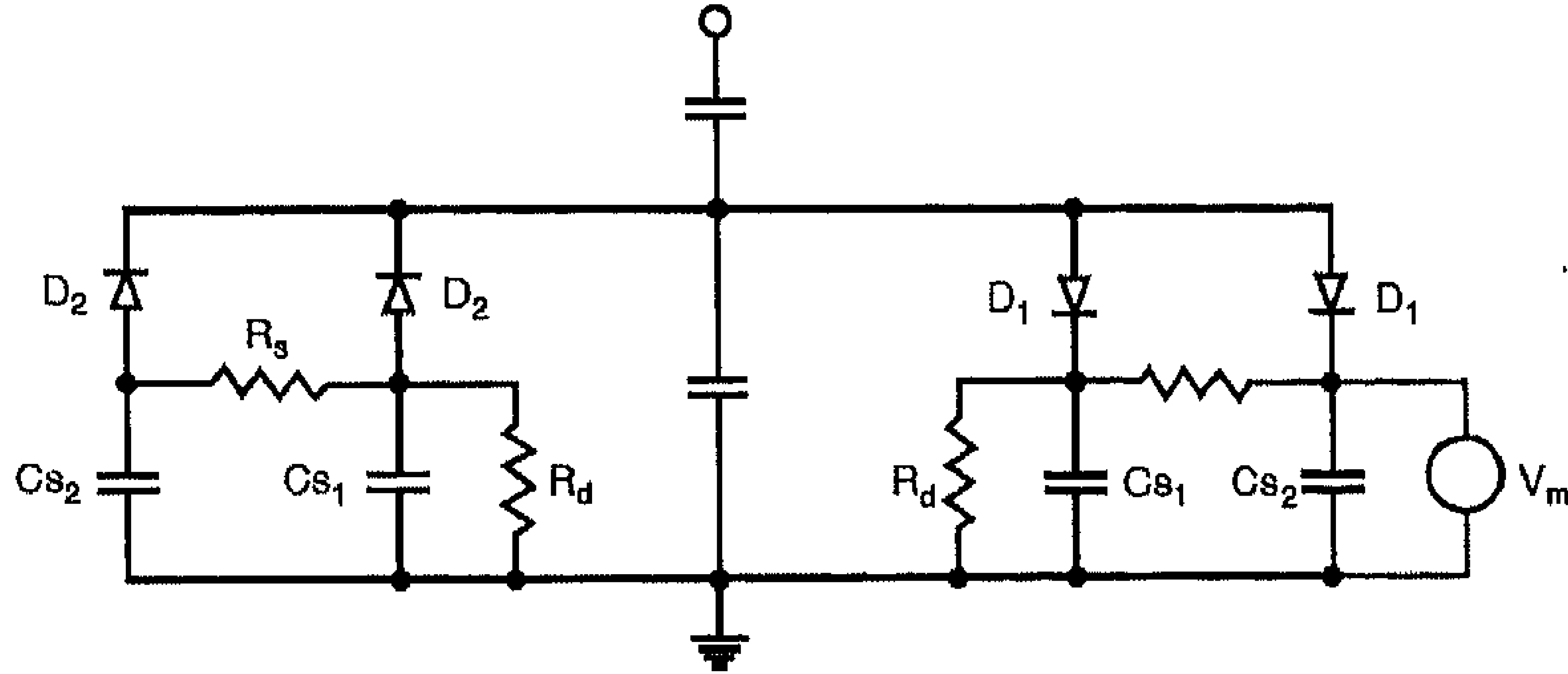
الشكل 10.13: دائرة فولتميتر ذروة معدلة

وقد لوحظ أيضاً أنه لكي نحفظ الخطأ الكلي عند قيمة منخفضة، مطلوب أن يكون لدينا قيمة عالية من R_2. ويمكن الحصول على نفس التأثير بإدخال ذراع موازن لذراع الجهد المنخفض لمقسم الجهد كما هو مبين في الشكل 10.13 ويتم ذلك بإضافة شبكة ثانية تشمل دايود، C_s، R_d للتيارات سالبة القطبية إلى الدائرة الموضحة في الشكل 10.12. مع هذا، تكون التيارات d.c في كلا الفرعين متعاكسة القطبية وتوازن بعضها البعض. وبذلك تمنع الأخطاء بسبب R_2.

وقد طور رابص Rabus دائرة أخرى موضحة في الشكل 10.14 لتخفيض الأخطاء الناجمة عن ا لمقاومات. حيث يوصل مكثفا تخزين بالمقاومة R_s داخل كل فرع ويفرغ كل منهما بواسطة مقاومة واحدة فقط R_d.

هنا بسبب وجود R_s، يتأخر تفريغ مكثف التخزين C_{s2} وبالتالي ينخفض خطأ التفريغ الأصلي e_d. ومع ذلك، حيث إن هذان مكثفان تخزين داخل فرع واحد، فإنهما سيسحبان شحنة أكبر من المكثف C_2 وبالتالي سيزداد خطأ إعادة الشحن e_r. ولذلك، فهو موضوع

تصميم عناصر مختلفة في الدائرة بحيث يكون المجموع الكلي لجميع الأخطاء في حده الأدنى. وقد لوحظ أنه مع عناصر الدائرة الشائعة الاستخدام في مقسمات الجهد، يمكن حفظ الخطأ في حدود حوالي 1% حتى لترددات أقل من 20 Hz .



الشكل 10.14: دائرة تعزيز طريقين مصممة بواسطة Rabus

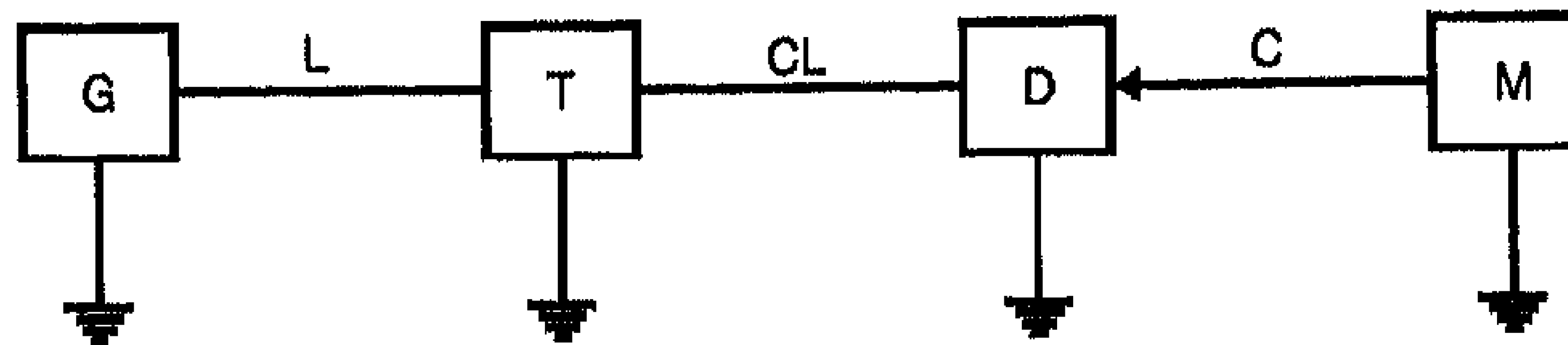
المكثف C_1 عليه أن يقاوم الجهد العالي المراد قياسه ويوضع دائماً داخل منطقة الاختبار بينما ذراع الجهد المنخفض C_2 شاملاً دائرة الذروة والأجهزة التي تشكل وحدة قياس توضع في منطقة التحكم. وبالتالي يكون مطلوب دائماً كابل محوري لتوصيل المنطقتين. وتأتي سعة الكابل متوازية مع السعة C_2 والتي تتغير عادة في خطوات إذا تغير الجهد المراد قياسه. تغيير طول الكابل سيتطلب أيضاً معايرة النظام. ويلتقط غلاف الكابل المحوري المجالات الكهرومغنطيسية وبذلك يمنع اختراق هذا المجال إلى قلب الموصل. أيضاً حتى ولو اخترقت مجالات مغنطيسية عابرة إلى داخل قلب الكابل، لا يستحث أي جهد محسوس [ضوضاء] بسبب النظام المتماثل ومن هنا يعطي الكابل المحوري توصيل جيد بين المنطقتين. وعندما يحدث تفريغ عند طرف الجهد العالي للمكثف C_1 إلى توصيل الكابل حيث يسعى التيار إلى تغير في المعاوقة يمكن أن يبنى جهد عالي ذات فترة دوام قصيرة عند طرف الجهد المنخفض للمكثف C_1 والذي يجب أن يكون محدوداً بواسطة استخدام جهاز واقي من الجهد الزائد [ثغرة حماية]. وستمنع هذه الأجهزة أيضاً التدمير الكامل لدائرة القياس إذا فشل عزل C_1.

١٠-٨ قياسات الجهد الدفعي [النبضي] باستخدام مُقسِّمات جهد

Impulse Voltage Measurements Using Voltage Dividers

إذا كانت سعات amplitudes الجهد الدفعي ليست عالية وفي مدى كيلوفولت قليل، من الممكن قياسهم حتى عندما تكون ذات دوام قصير باستخدام CROS. ومع ذلك، إذا كانت الجهود المراد

قياسها ذات مقدار عالي في حدود عدة ميجافولت والتي هي عادة حالة الاختبار وأغراض البحوث، تنشأ مشاكل مختلفة. مقسمات الجهد المطلوبة تكون ذات تصميم خاص وتحتاج فهم الفعل المتبادل الموجود في أنظمة تقسيم الجهد هذه. الشكل 10.15 يبين مخطط لدائرة اختبار جهد داخل منطقة اختبار جهد عالي. مولد الجهد G موصل بهدف اختبار T خلال موصل L.



الشكل 10.15: دائرة اختبار جهد أساسية

هذه العناصر الثلاثة تشكل نظام توليد جهد. يتكون الموصل L من سلك رصاص ومقاومة لتخميد الذبذبات أو الحد من تيارات دائرة القصر إذا سقط هدف الاختبار T. ويبدأ نظام الاختبار عند أطراف هدف الاختبار ويتكون من موصل توصيل connecting lead CL إلى مقسم الجهد D. ويغذي خرج المقسم إلى جهاز القياس M [مثلاً CRO، ...إلخ]. ويجب أن تضمن توصيله الراجع الأرضي المختصة هبوط جهد منخفض للظواهر العابرة وتحفظ الجهد الأرضي عند الصفر كلما أمكن.

ويجب ملاحظة أن هدف الاختبار يكون عنصر سعوي في الغالب وهكذا يشكل دائرة تذبذبية مع محاثة الحمل. هذه الذبذبات من المحتمل أن تثار بواسطة أي ارتفاع حاد في الجهد من خرج المولد، ولكنه سيكشف جزئياً بواسطة مقسم الجهد. ومقاومة على التوالي مع موصلات التوصيل تخمد هذه الذبذبات. ويجب أن يوصل مقسم الجهد دائماً خارج دائرة المولد في اتجاه دائرة الحمل [هدف الاختبار] لدقة القياس. وفي حالة توصيله داخل دائرة المولد، وهدف الاختبار يفرغ المولد كله شاملاً مقسم الجهد ستتفرغ بواسطة دائرة القصر هذه عند هدف الاختبار وبذلك يحمل مقسم الجهد بواسطة هبوط الجهد عبر الموصل L. ونتيجة لذلك سيكون قياس الفولت خطأ.

ومع ذلك ولأسباب أخرى، يجب أن يوضع مقسم الجهد بعيداً عن دائرة المولد. ولا يمكن أن تحمي المقسمات ضد المجالات الخارجية. كل الأشياء في جوار المقسم والتي يمكن أن تكتسب جهود عابرة أثناء الاختبار ستؤدي إلى اضطراب توزيع المجال وبالتالي أداء المقسم. لذلك، فإن موصل التوصيل CL هو جزء مكمل لدائرة مقسم الجهد.

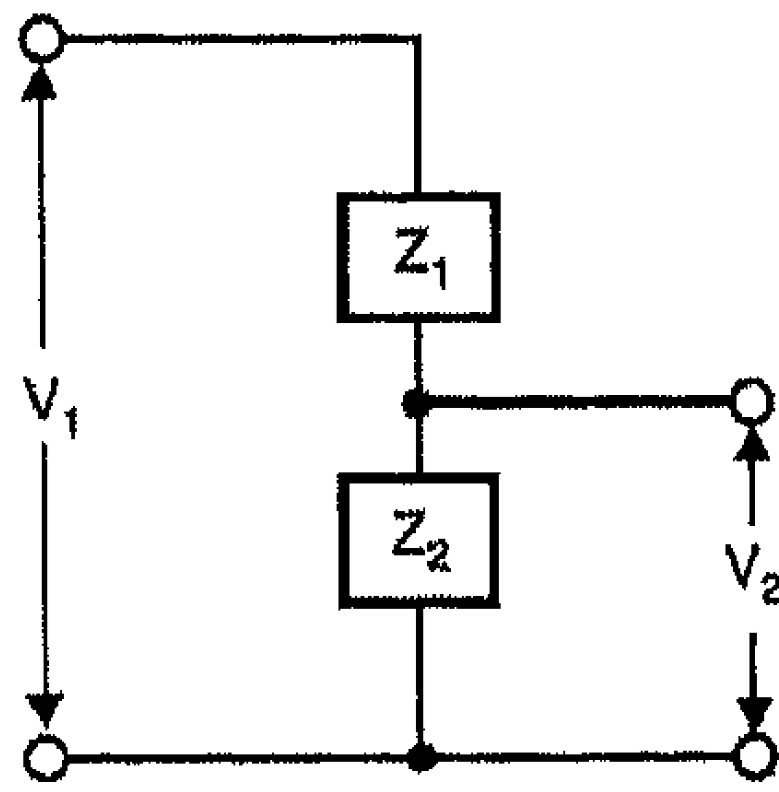
ولكي نتجنب التداخل الكهرومغنطيسي بين جهاز القياس M ، C وهي منطقة اختبار الجهد العالين يجب اختيار طول كابل التأخير بشكل متناسب. فطول الكابل القصير جداً يمكن أن يستخدم فقط إذا كان جهاز القياس له مستوى عالي من التوافق الكهرومغنطيسي EMC. لأي نوع من الجهد يراد قياسه، يجب أن يكون طراز الكابل متحد-المحور [محوري co-axial]. ويعطي الموصل الخارجي وقاية ضد المجال الكهروستاتيكي وبذلك يمنع اختراق هذا المجال إلى الموصل الداخلي. وبالرغم من ذلك، فإن المجالات المغنطيسية العابرة ستخترق الكابل، ولن يستحث أي جهد محسوس بسبب النظام المتماثل. ويمكن استخدام الكابلات المحورية العادية ذات الوقاية المضفرة للجهود a.c ، d.c. ومع ذلك، بالنسبة لقياس الجهد النبضي ستستخدم كابلات مزدوجة الوقاية double shielded ذات غطاءان واقيان مضفران ومعزولان لدقة أفضل.

أثناء تمزق هدف الاختبار، تسري تيارات عابرة ثقيلة جداً وبالتالي فإن جهد الأرض يمكن أن يرتفع إلى قيم عالية خطيرة إذا لم يتم التزود بالتأريض المناسب. ولهذا، تستخدم ألواح معدنية كبيرة من مادة عالية التوصيل مثل النحاس أو الألمنيوم. وتتزود معظم معامل الجهد العالي الحديثة بهذا الراجع الأرضي مع قفص فاراداي Faraday Cage للحماية الكاملة للمعمل. وتعطي الألواح المعدنية الممتدة نفس الأداء. ويجب استخدام شرائط معدنية ذات عرض كبير على الأقل لتخفيض المعاوقة.

١٠-٨-١ مُقَسْمات الجهد Voltage Divider

مقسمات الجهد للجهود a.c ، d.c والنبضية يمكن أن تتكون من مقاومات أو مكثفات أو توليفة مناسبة من هذه العناصر. ملفات الحث [الخوانق] لا تستخدم عادة كعناصر تقسيم الجهد حيث إن المحاثة النقية ذات القيم المناسبة بدون سعة شاردة لا يمكن أن تبنى وأيضاً فإن هذه المحاثات يمكن أن تشكل دائرة تذبذبية مع السعة الأصلية للجهاز المختبر وهذا يمكن أن يؤدي إلى عدم دقية في القياس وجهود عالية في دائرة القياس. ويعتمد ارتفاع مقسم الجهد على جهد الشرر ويتأتى ذلك من أقصى جهد مقنن مؤثر. والآن، يمكن أن لا يكون توزيع الجهد منتظماً وبالتالي يعتمد الارتفاع أيضاً على تصميم إلكترود الجهد العالي، إلكترود القمة. وبالنسبة للجهود في مدى الميجافولت، يصبح ارتفاع المقسم كبيراً. وكقاعدة إبهام يمكن أن نفترض الخلوصات الآتية بين إلكترود القمة والأرض:

- (2.5–3) m/MV للجهود d.c.



الشكل 10.16: المخطط الأساسي لدائرة مقسم الجهد

- (2–2.5) m/MV للجهود النبضية الصاعقة.
- أكثر من 5 m/MV للجهود a.c.
- أكثر من 4 m/MV للجهود النبضية لتشغيل المفاتيح.

ويمثل مقسم الجهد ببساطة بواسطة معاوقتان Z_1 ، Z_2 موصلتان على التوالي وتؤخذ عينة الجهد المطلوبة للقياس عبر Z_2 [الشكل 10.16].

إذا كان الجهد المراد قياسه هو V_1 وعينة الجهد V_2، فإن:

$$V_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_1$$

إذا كانت المعاوقات هي مقاومات صرفة فإن:

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1$$

وفي حالة استخدام سعات صرفة فإن:

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1$$

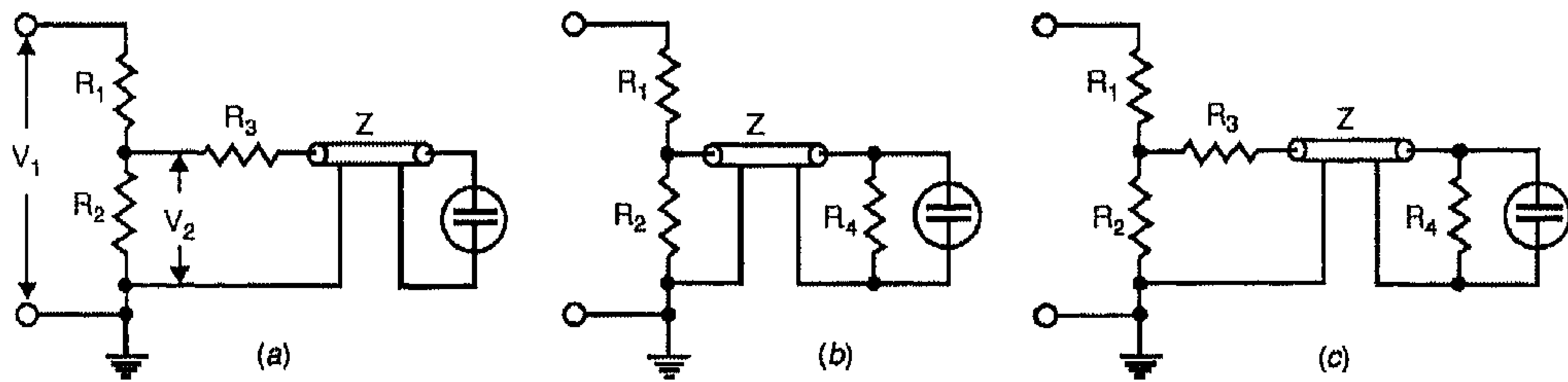
ويكون الجهد V_2 عادة مئات قليلة من الفولتات وبالتالي فإن قيمة Z_2 يتم اختيارها بحيث تعطي V_2 عبرها انحراف كافي على CRO. لذلك، فإن معظم هبوط الجهد يكون متاحاً عبر المعاوقة Z_1 وحيث إن الجهد المراد قياسه يكون في مدى الميجافولت فإن طول Z_1 يكون كبيراً مما يؤدي إلى قياسات غير دقيقة بسبب السعات الشاردة المرتبطة بمقسمات الجهد الطويلة [وخاصة مع قياسات الجهد النبضي] إذا لم تتخذ احتياطات خاصة. على جانب الجهد المنخفض لمقسمات الجهد حيث يجب استخدام كابل محجب ذات طول محدد للتوصيل بالأوسليجراف يمكن حدوث أخطاء أخرى وتشوهات في شكل الموجة.

مقسمات جهد المقاومة Resistance Potential Dividers

وهي الأولى بسبب بساطة التركيب، مطالب الفراغ الأقل، الوزن الأقل وسهولة النقل. ويعتمد طول المقسم على عاملين أو ثلاثة. الأول هو أقصى جهد يراد قياسه إذا كان الارتفاع قيد، يمكن أن يعتمد الطول على تدرج شرر السطح في حدود (3–4) kV/cm بغض النظر عما إذا كانت

المقاومة R_1 سائلة أو سلك ملفوف. ويعتمد الطول أيضاً على قيمة المقاومة ولكن هذا يكون ضمنياً مقيد بالسعة الشاردة لعمود المقاومة، حاصل ضرب الاثنين $[RC]$ يعطي ثابت زمني قيمته يجب أن لا تتعدى فترة دوام جبهة الموجة المطلوب تسجيلها.

ويجب أن نلاحظ مع الحرص أن مقاومة مقسم الجهد يجب أن تتوائم مع المقاومة المكافئة لمولد معطى للحصول على شكل موجة معطى.



الشكل 10.17: أشكال مختلفة من دوائر مقسمات جهد المقاومة. (a) مواءمة عند طرف المقسم؛ (b) مواءمة عند طرف الأوسليجراف؛ (c) مواءمة عند كل من طرفي كابل التعويض

الشكل 10.17(a) يوضح شكل شائع لمقسم جهد مقاومة يستخدم لأغراض الاختبارات حيث إن زمن جبهة الموجة للموجة يكون أقل من 1 μ sec. حيث R_3، المقاومة عند طرف المقسم لكابل التعويق تختار بحيث $R_2+R_3=Z$ والتي تضع حد علوي على R_2 أي أن $R_2<Z$. في الحقيقة، أحياناً يعطى شرط المواءمة كالتالي:

$$Z = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

ولكن حيث إن $R_1 >> R_2$ عادة، فإن العلاقة السابقة تختصر إلى $Z = R_3 + R_2$. ومن الشكل 10.17(a) فإن الجهد الذي سيظهر عبر R_2 يكون:

$$V_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + R_1} V_1$$

حيث Z_1 هي المعاوقة المكافئة لـ R_2 على التوازي مع $Z + R_3$.

معاوقة تمور الكابل تمثل بالمعاوقة Z مع الأرض. والآن:

$$Z_1 = \frac{(Z + R_3)R_2}{R_2 + Z + R_3} = \frac{(Z + R_3)R_2}{2Z}$$

ولذلك فإن:

$$V_2 = \frac{(Z+R_3)R_2}{2Z}\frac{V_1}{Z_1+R_1}$$

ومع ذلك، يكون الجهد الداخل إلى كابل التأخير delay cable هو:

$$V_3 = \frac{V_2}{Z+R_3}Z$$

$$= \frac{Z}{Z+R_3}\cdot\frac{(Z+R_3)R_2}{2Z}\cdot\frac{V_1}{Z_1+R_1} = V_1\frac{R_2}{2(Z_1+R_1)}$$

عند هذا الجهد تصل الموجة إلى طرف CRO لكابل التأخير، وتعاني من انعكاسات حيث إن المعاوقة المقدمة بواسطة الـ CRO تكون غير محددة ونتيجة لذلك فإن موجة الجهد المنقولة إلى CRO تكون مضاعفة. ولذلك يسجل CRO جهد V_3' كالآتي:

$$V_3' = \frac{R_2}{Z_1+R_1}V_1$$

ومع ذلك، فإن الموجة المنعكسة، عندما تصل ذراع الجهد المنخفض لمقسم الجهد لا تعاني من أي انعكاس حيث $Z = R_2 + R_3$ وتمتص كلياً بـ (R_2+R_3).

وحيث إن R_2 أصغر من Z ، Z_1 هي توليفة موازية لـ R_2 ، (R_3+Z) ، Z_1 تكون أصغر من R_2 ، وحيث إن R_1 □ R_2 ، فإن R_1 ستكون أكبر من Z_1 ، ولذلك، فإن التقريب الأول $Z_1+R_1 \approx R_1$ ، ولذلك:

$$V_3' = \frac{R_2}{R_1}V_1 \approx \frac{R_2}{R_1+R_2}V_1$$

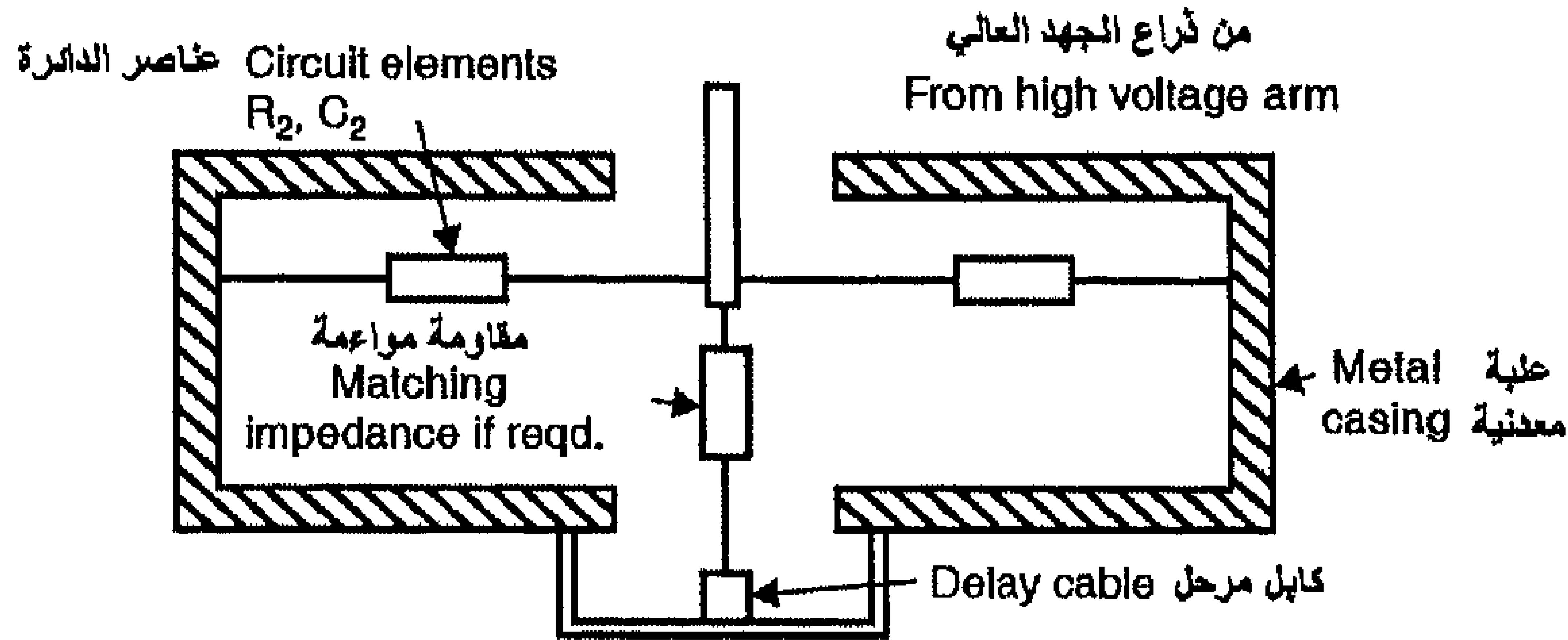
حيث R_2 □ R_1.

الشكلان 10.17(b) ، 10.17(c) هما دوائر مختلفة لدائرة مقسم جهد الشكل 10.17(a). ويبين الشكل 10.18 قطاع لذراع الجهد المنخفض الممكن لمقسم الجهد.

مقسمات جهد السعة Capacitance Potential Dividers

وهي أكثر تعقيداً عن طراز المعاوقة. لقياس الجهود النبضية التي لا تتعدى 1 MV يمكن أن تكون مقسمات السعة نقالة أو قابلة للتنقل. عامة، لقياس 1 MV وأكثر، يكون مقسم السعة مثبت في المعمل. ويصنع مقسم السعة عادة من وحدات مكثف مركبة واحد فوق الآخر ومثبتة بمسامير معاً. وهي هذه السمة التي تجعل المقسمات الصغيرة نقالة. صندوق حجب [فصل]

مماثل لذلك السابق وصفه يمكن أن يستخدم لاقتناء كل من وحدة مكثف الجهد المنخفض C_2 ومقاومة المواءمة إذا كان مطلوباً.



الشكل 10.18: قطاع في ذراع الجهد المنخفض لمقسم الجهد

مكثف الجهد المنخفض C_2 يجب أن لا يكون حثي non-inductive. شكل المكثف الذي أعطى نتائج ممتازة كان من الميكا ولوح رقيق من القصدير، وكل رقيقة لها أطراف موصلة تخرج من أركان متعاكسة. وهذا يضمن أن التيار لا يستطيع المرور من دائرة الجهد العالي إلى كابل التأخير delay cable بدون الذهاب فعلياً خلال إلكترودات الرقائق. ومن المهم أيضاً أن التقارن بين أذرع الجهد العالي والمنخفض للمقسم يكون سعوي صرف. إذن، يجب أن يحتوي ذراع الجهد المنخفض على مكثف واحد فقط، ويجب تجنب مكثفان أو أكثر على التوازي بسبب المحاثة المحسوسة التي ستقدم. علاوة على ذلك، التفريعات إلى كابل التأخير يجب أن تؤخذ قريبة ما أمكن لأطراف C_2. الشكل 10.19 يبين بعض أنواع مقسمات الجهد طراز السعة.

بالنسبة لمقسمات الجهد في الشكل 10.19(b)، 10.19(c) لا يمكن مواءمة كابل التأخير عند أطرافها. مقاومة منخفضة موازية لـ C_2 ستحمل ذراع الجهد المنخفض للمقسم بثقل جداً وتخفض جهد الخرج مع الزمن. وحيث إن R، Z يشكلان مقسم جهد، $R = Z$، فإن دخل الجهد إلى الكابل سيكون نصف الجهد عبر المكثف C_2. ويرحل نصف الجهد هذا في اتجاه الطرف المفتوح للكابل [طرف CRO] ويتضاعف بعد الانعكاس. أي أن، الجهد المسجل بواسطة الـ CRO يكون مساوياً للجهد عبر المكثف C_2. وتشحن الموجة المنعكسة الكابل إلى مقدار الجهد النهائي ويمتص بواسطة R [أي أن الانعكاس يحدث عند R، وحيث $R = Z$، فإن الموجة تمتص تماماً حيث معامل انعكاس الجهد صفر] وحيث يعمل المكثف C_2 كدائرة قصر لموجات التردد العالي. نسبة التحويل –لذلك– تتغير من القيمة

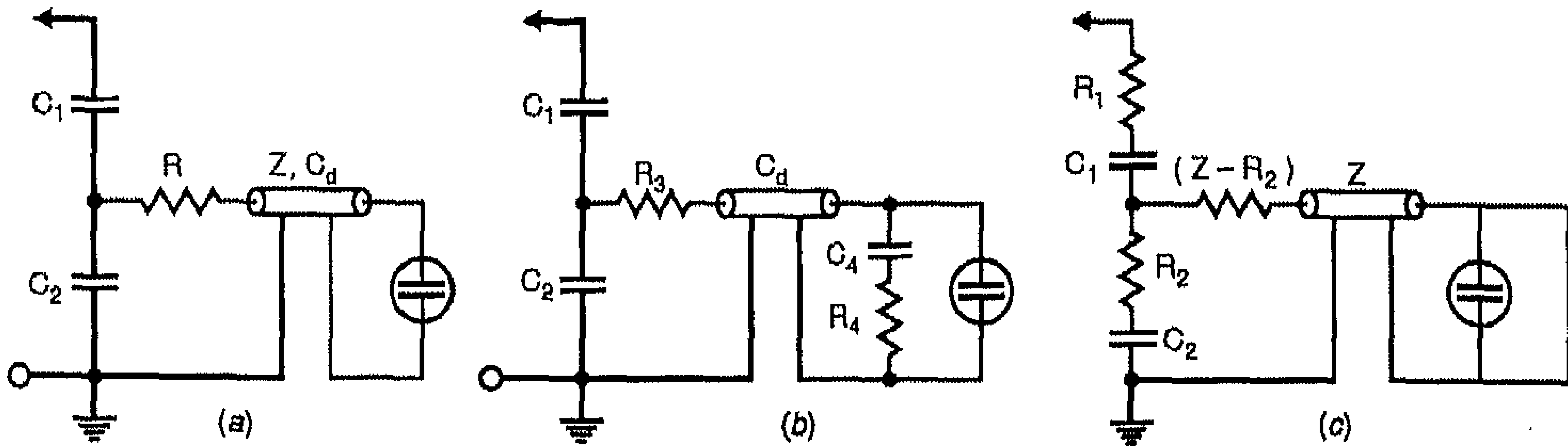
$$\frac{C_1+C_2}{C_1}$$

للترددات العالية جداً إلى القيمة

$$\frac{C_1+C_2+C_4}{C_1}$$

للترددات المنخفضة.

ومع ذلك، فإن سعة كابل التأخير C_d تكون عادة صغيرة مقارنة بـ C_2.

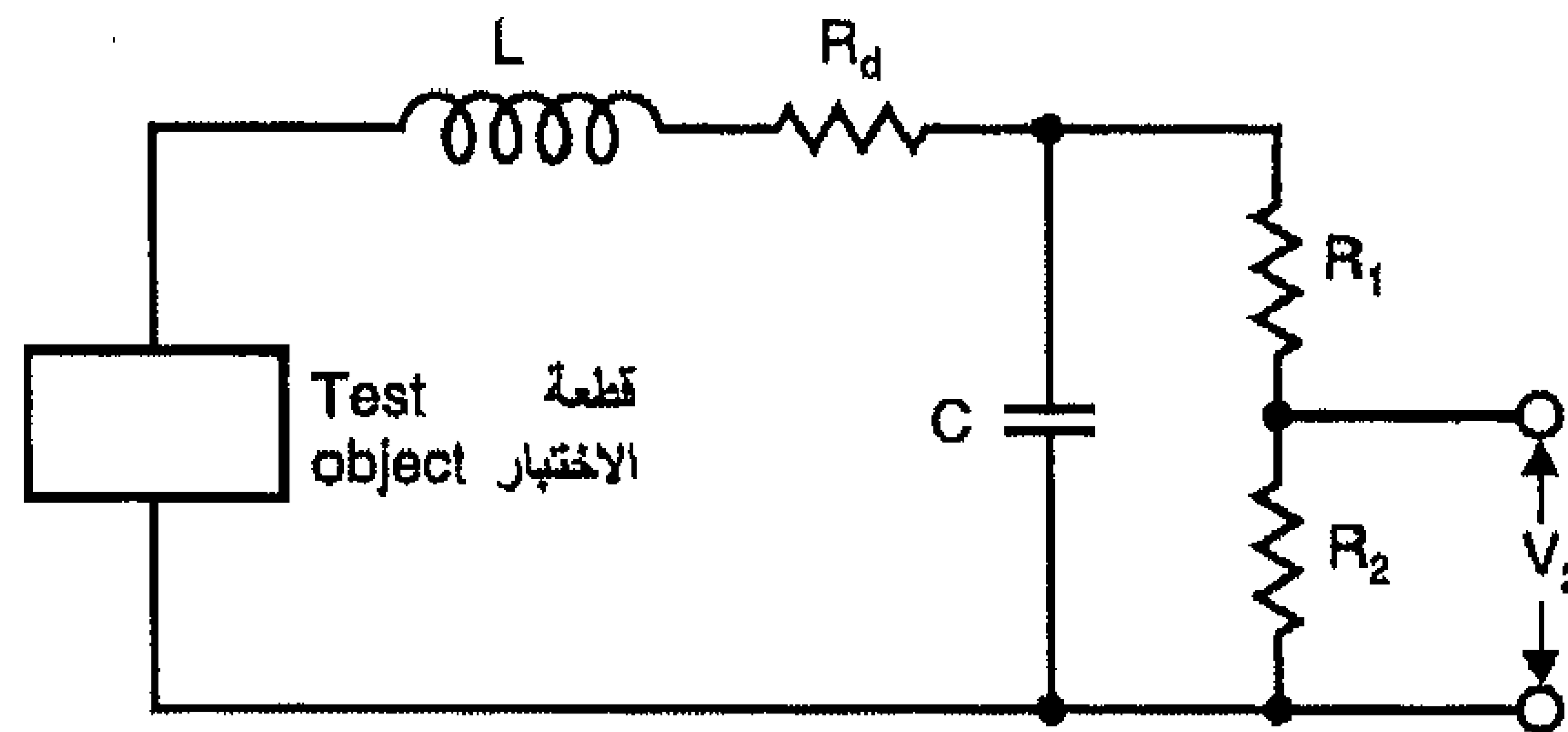


الشكل 10.19: مقسمات سعة. (a) مواءمة بسيطة؛ (b) مواءمة معوضة؛ (c) مقسم سعة متضائل مواءمة بسيطة

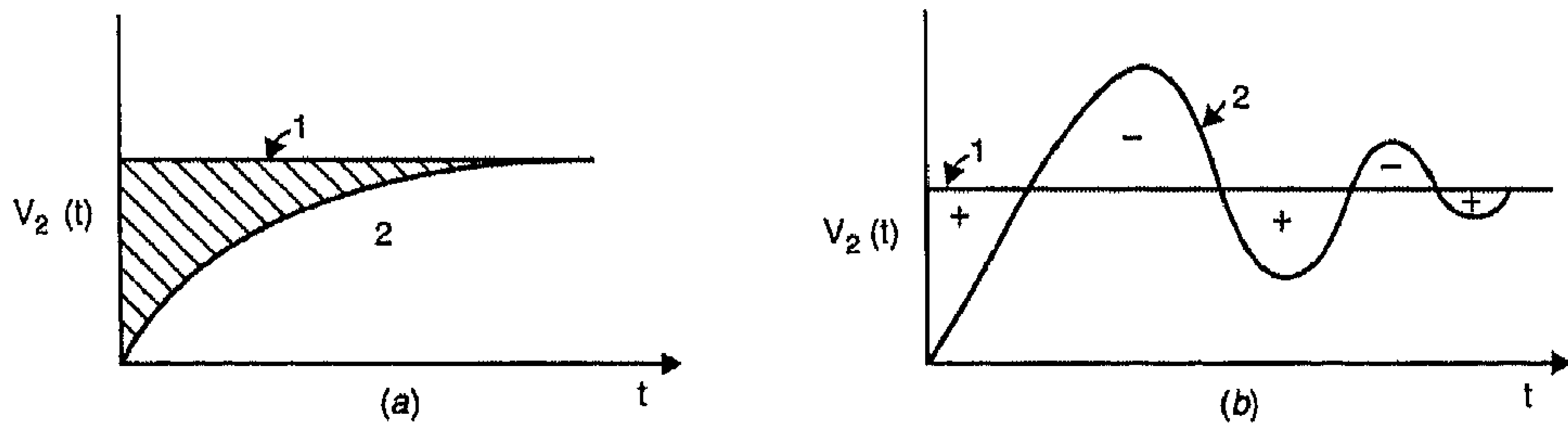
بالنسبة لمقسم السعة توصل عادة مقاومة تخميد إضافية في الموصل على جانب الجهد العالي كما في الشكل 10.19(c) ويمكن أن يتحسن أداء المقسم إذا كانت مقاومة التخميد التي تقابل حالة مقيدة دورية قد أدخلت على التوالي مع العنصر المنفرد لمقسم الجهد. هذا النوع من المقسم السعوي المخمد يعمل للترددات العالية كمقسم مقاوم وللترددات المنخفضة كمقسم سعوي. ولذلك، يستطيع أن يستخدم عبر مدى واسع من الترددات أي للجهود النبضية ذات الدوام المختلف وأيضاً للجهود المترددة.

ويبين الشكل 10.20 مخطط مبسط لمقسم جهد مقاومة بعد الأخذ في الاعتبار السبق في التوصيل حيث إن المحاثة والسعة الشاردة كسعة مجمعة. وهنا L تمثل محاثة الإطار لتوصيله ذراع الجهد العالي. مقاومة التخميد R_d تحد من التجاوزات العابرة في الدائرة المشكلة من قطعة الاختبار L، R_d، C. قيمتها لها تأثير مقرر على أداء المقسم. ولكي نقيم تحويل الجهد للمقسم، يجب فحص جهد ذراع الجهد المنخفض V_2 الناتج من جهد نبضي مربع الموجة V_1 على الجانب HV. الجهد V_2 يتبع منحنى 2 في الشكل 10.21(a) في حالة تخميد

دوري والمنحنى 2 في الشكل 10.21(b) في حالة تخميد تحت-الحرج. المساحة الكلية بين المنحنيات 1، 2 آخذين في الاعتبار القطبية، توصف بزمن الاستجابة.



الشكل 10.20: مخطط بسيط لمقسم جهد طراز مقاومة



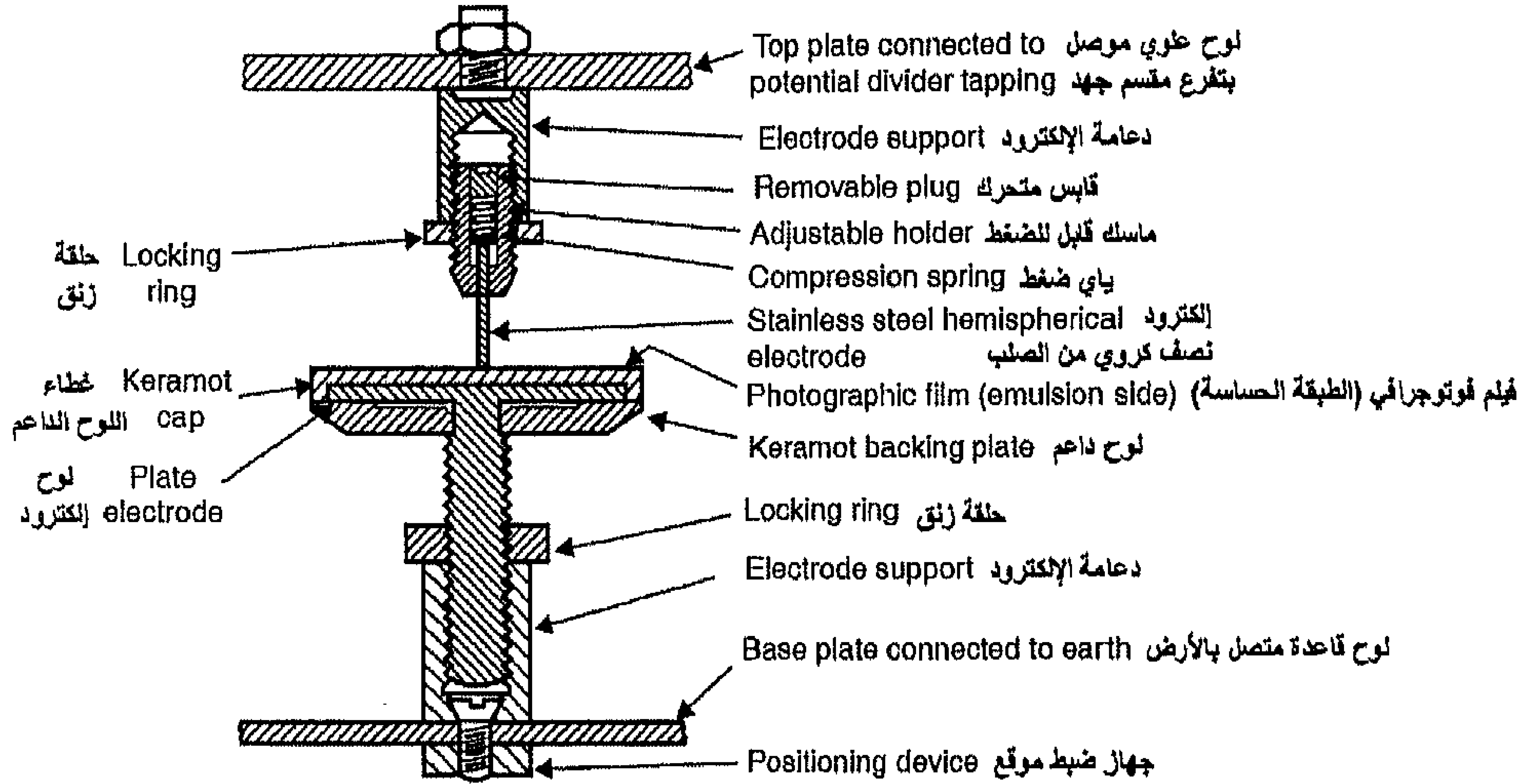
الشكل 10.21: استجابة مقسم جهد المقاومة

مع التخميد تحت الحرج، وبالرغم من أن زمن الاستجابة يكون أصغر. فإن التخميد لا يجب أن يكون صغيراً جداً. وهذا لأنه يمكن حدوث رنين غير مرغوب لتردد معين داخل نطاق التردد المار بالمقسم. ولذلك يجب تحقيق توافق بين زمن الارتفاع القصير والاستقرار السريع لنظام القياس. وحسب تعليمات IEC رقم 60 يسمح بزيادة قصوى 3% لموجة النبضة الكاملة، 5% لموجة النبضة المشطورة في الأمام عند أزمنة أقصر من 1 μ sec. . ولكي ننجز هذه المطالب فإن زمن استجابة المقسم لا يجب أن يتعدى 0.2 μ sec. . لموجات النبضة الكاملة 1.2/50 أو 1.2/5 أو الموجات النبضية المشطورة عند الذيل. إذا كانت الموجة النبضية مشطورة في الأمام عند زمن أقصر من 1 μ sec. فإن زمن الاستجابة يجب أن يكون ليس أكبر من 5% من زمن الشطر.

١٠-٨-٢ الكلايدنوجراف أو مُسْجِل التمور Klydonograph or Surge Recorder

حيث إن تمورات الصواعق تكون نادرة وعشوائية في طبيعتها، فمن الضروري تركيب عدد كبير من أجهزة التسجيل للحصول على كمية معقولة من البيانات المتعلقة بهذه التمورات الناتجة

على خطوط النقل والمعدات الأخرى. وتم تطوير بعض الأجهزة البسيطة لهذا الغرض. والكلايدنوجراف هو أحد هذه الأجهزة التي تستغل النماذج المعروفة بأشكال ليتشينبرج Litchenberg والتي تنتج على فيلم فوتوجرافي بواسطة تفريغات كورونا سطحية.



الشكل 10.22: الكلايدنوجراف

ويتكون الكلايدنوجراف [الشكل 10.22] من إلكترود مستدير يستند على جانب الطبقة الحساسة لفيلم فوتوجرافي أو لوح محفوظ على السطح الناعم للوح مادة عازلة مستندة على لوح إلكترود. أدنى جهد حرج ينتج شكل يكون حوالي 2 kV وأقصى جهد يمكن أن يسجل يكون حوالي 20 kV، حيث عند جهود أعلى يُفسد الشرر الناتج الفيلم. ويمكن أن يستخدم الجهاز مع مقسم جهد لقياس جهود أعلى ومع مجزئ مقاومة لقياس تيار نبضي.

توجد فروقات مميزة بين أشكال الجهود الموجبة والسالبة. ومع ذلك، فلكل من القطبيتان فإن نصف قطر الشكل [إذا كان متماثلاً] أو أقصى مسافة من مركز الشكل إلى حافته الخارجية [إذا كان غير متماثل] تكون دالة في الجهد المؤثر فقط. وتنتج الجهود المتذبذبة تأثيرات متراكبة لكل جزء من الموجة. وهكذا فمن الممكن معرفة ما إذا كانت الموجة موحدة الاتجاه أم متذبذبة. وحيث إن حجم الشكل للقطبية الموجبة يكون أكبر، فمن المفضل استخدام أشكال قطبية موجبة. ويكون ذلك مرغوباً في حالة قياس التمورات surges على خطوط النقل أو خلافه مثل الأجهزة المشغلة على جهد a.c والجهد المتردد يعطي نطاق أسود بطول مركز الفيلم الناشئ من تراكب الأشكال الموجبة والسالبة الناتجة على كل نصف دورة. وبالنسبة لكل جهد تمور من

الممكن الحصول على كل من أشكال القطبية الموجبة والسالبة بواسطة توصيل أزواج الإلكترودات على التوازي، أحد الأزواج مع نقطة الجهد العالي واللوح المؤرض والزوج الآخر مع لوح الجهد العالي ونقطة مؤرضة.

الكلايدنوجراف جهاز بسيط ورخيص، ويمكن استخدام عدد كبير من العناصر للقياس. وقد استخدم في الماضي بتوسع لإعطاء بيانات إحصائية عن مقدار، قطبية وتردد تمورات الجهد في خطوط نقل الطاقة الكهربية بالرغم من دقة قياسه في حدود 25% فقط.

١٠-٩ قياس التيار المستمر العالي والتيارات النبضية

Measurement of High D.C & Impulse Currents

تستخدم التيارات العالية في نظام القدرة لاختبار قواطع الدائرة، الكابلات، مانعات الصواعق، ...إلخ. وتصادف التيارات العالية أثناء تفريغات الصواعق، عابرات تشغيل المفاتيح وأعطال التفرعات. وهذه التيارات تتطلب تقنيات خاصة لقياسها.

١٠-٩-١ التيارات المستمرة العالية High Direct Currents

تستخدم مقاومات التوازي المنخفضة لقياس هذه التيارات. هبوط الجهد عبر مقاومات التوازي هذه تقاس بمساعدة ميلليفولتميتر. وتتغير قيمة المقاومة عادة بين $10\ \mu\Omega$، $13\ m\Omega$. ويعتمد ذلك على تأثير التسخين والتحميل المسموح في الدائرة. هبوط الجهد يكون محدداً بميلليفولتات قليلة عادة أقل من 1 V . هذه المقاومات تكون مغمورة في الزيت ومصنعة كمقاومات ثلاثية أو رباعية الأطراف لتعطي أطراف منفصلة لقياس الجهد بدقة جيدة.

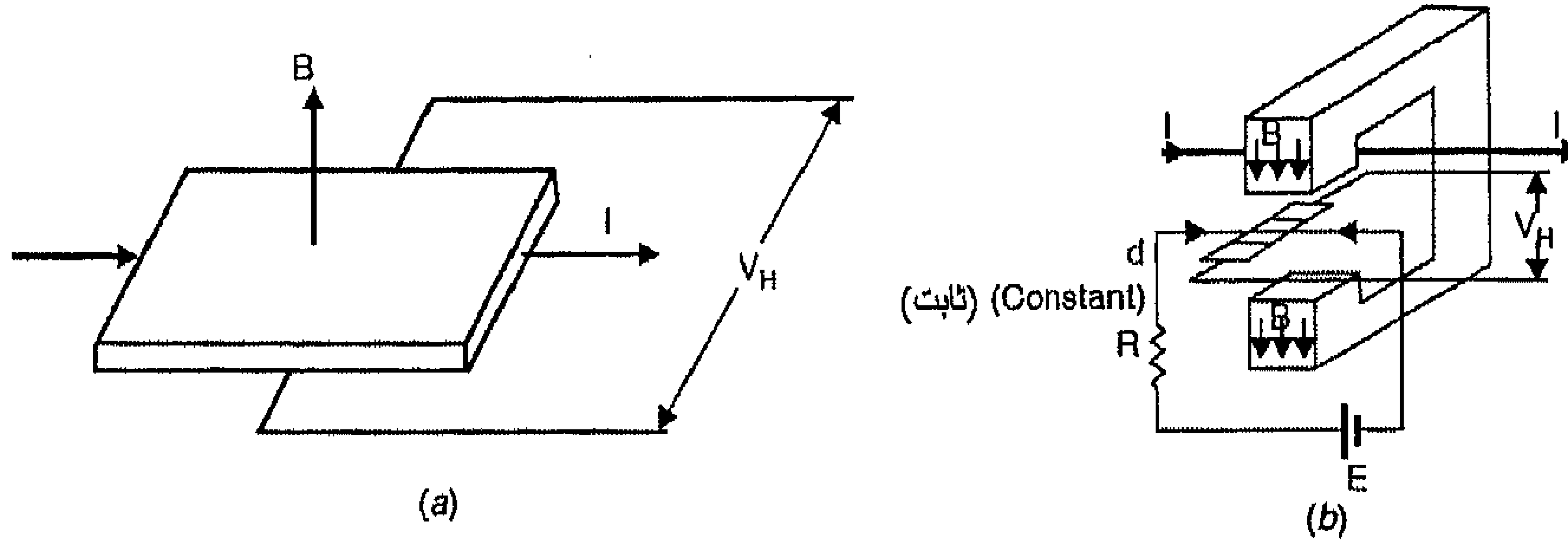
١٠-٩-٢ مولدات هال Hall Generators

تستخدم ظاهرة هال Hall effect [الشكل 10.23] لقياس التيار المستمر العالي جداً. فعندما يسري تيار كهربي خلال لوح معدني موجود في مجال مغنطيسي عمودي عليه، فإن قوة لورينز Lorenz force ستحرف الإلكترونات في المعدن في اتجاه عمودي على اتجاه كل من المجال المغنطيسي وتدفق التيار. إزاحة الشحنة تؤدي إلى قوة دافعة كهربية e.m.f في الاتجاه العمودي تسمى "جهد هال"، وجهد هال يكون متناسباً مع التيار I، كثافة الفيض المغنطيسي B وتتناسب عكسياً مع سمك اللوح d، أي أن:

$$V_H = R\frac{B\,I}{d}$$

حيث $R=$ معامل هال، والذي يعتمد على مادة اللوح ودرجة حرارته.

وبالنسبة للمعادن يكون R صغيراً جداً وبالتالي تستخدم المواد شبه الموصلة التي R لها تكون عالية.



الشكل 10.23: مولد هال

عندما نريد قياس تيارات d.c كبيرة فإن الموصل الحامل للتيار يمر خلال دائرة مغنطيسية ذات قلب حديدي [الشكل (b)10.23]. شدة المجال المغنطيسي الناتج بواسطة الموصل في الثغرة الهوائية عند عمق d تعطى كالآتي:

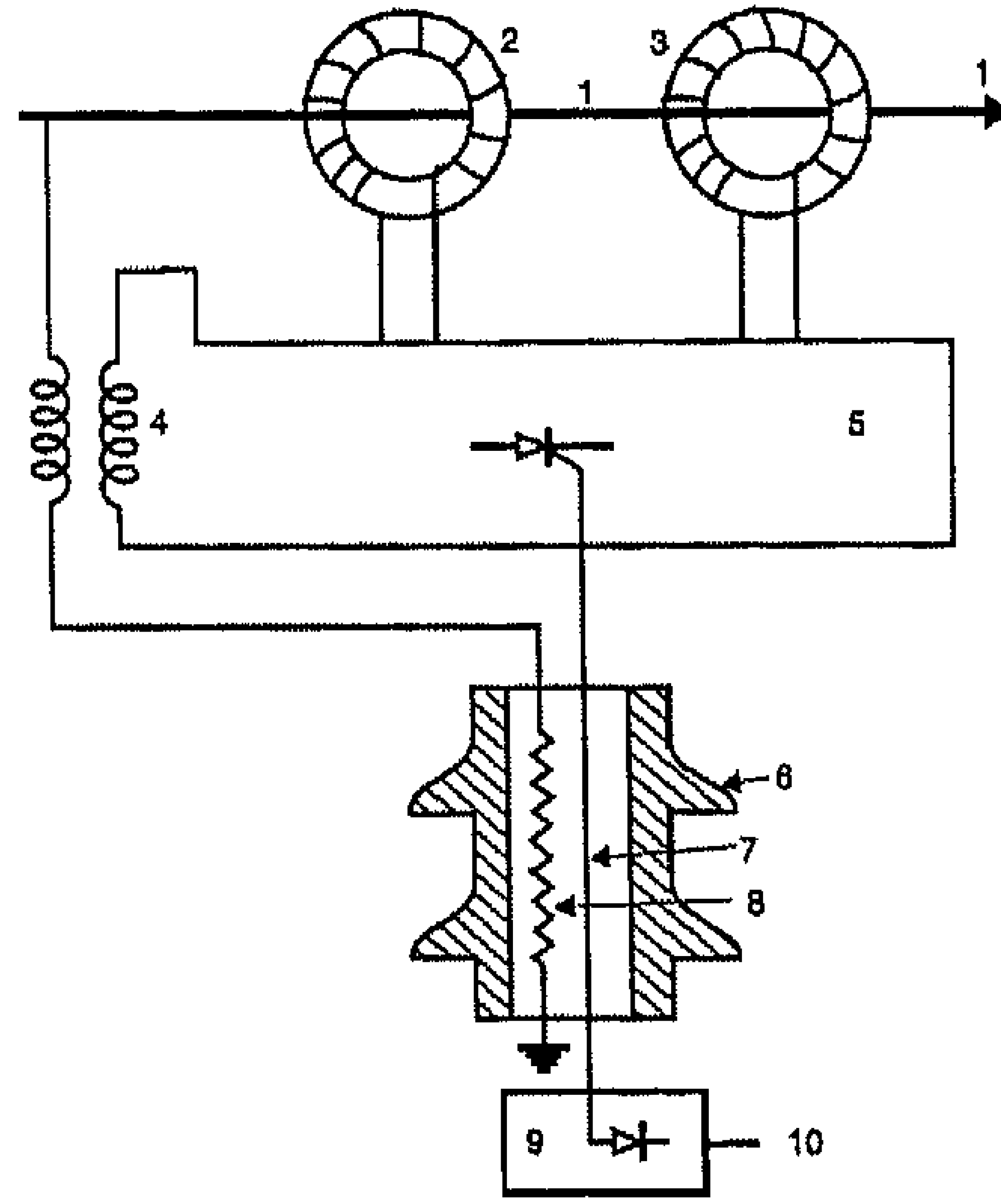
$$H=\frac{I}{2\pi d}$$

ويوضع عنصر هال في الثغرة الهوائية ويمر تيار d.c ثابت صغير عبر العنصر ويقاس الجهد المتولد عبر عنصر هال وباستخدام تعبير جهد هال V_H تحسب كثافة الفيض B ثم نحصل على قيمة التيار I.

١٠-٩-٣ تيارات تردد القدرة العالية High Power Frequency Currents

تيارات تردد القدرة العالية تقاس عادة باستخدام محولات تيار، إلى جانب ذلك تعطي محولات التيار عزل من دوائر الجهد العالي وهكذا تكون أكثر أمناً للعمل على دوائر HV. الشكل 10.24 يوضح نظام لقياسات التيار باستخدام محولات التيار والتقنية الكهروبصرية.

وتنتج إشارة جهد تتناسب مع التيار المراد قياسه وترسل إلى الأرض خلال جهاز كهروبصري. نبضات ضوئية تتناسب مع إشارة الجهد ترسل بواسطة حزمة ألياف ضوئية زجاجية إلى كاشف ضوئي وتتحول عائدة إلى إشارة جهد أنالوج. القدرة المطلوبة لمحول الإشارة والجهاز البصري يتم الحصول عليها من تيار مناسب ومحولات جهد.



الشكل 10.24: محولات التيار والنظام الكهروبصري لقياسات التيار a.c العالي

١٠-٩-٤ تيارات التردد العالي والنبضية High Frequency & Impulse Currents

في نظام القدرة يمكن أن تتغير قيمة الذروة [سعة التردد] للتيارات ما بين أمبيرات قليلة إلى عدة مئات قليلة من الكيلوأمبير ويمكن أن يكون معدل ارتفاع التيارات عند 10^{10} A/s ويمكن أن يتغير زمن الارتفاع من قليل من الميكروثانية إلى قليل من الماكروثانية. لذلك، فإن الجهاز المراد استخدامه لقياس تلك التيارات يجب أن يكون قادراً على أن يكون له استجابة تردد جيدة عبر نطاق تردد واسع جداً. والطرق المستخدمة عادة هي:

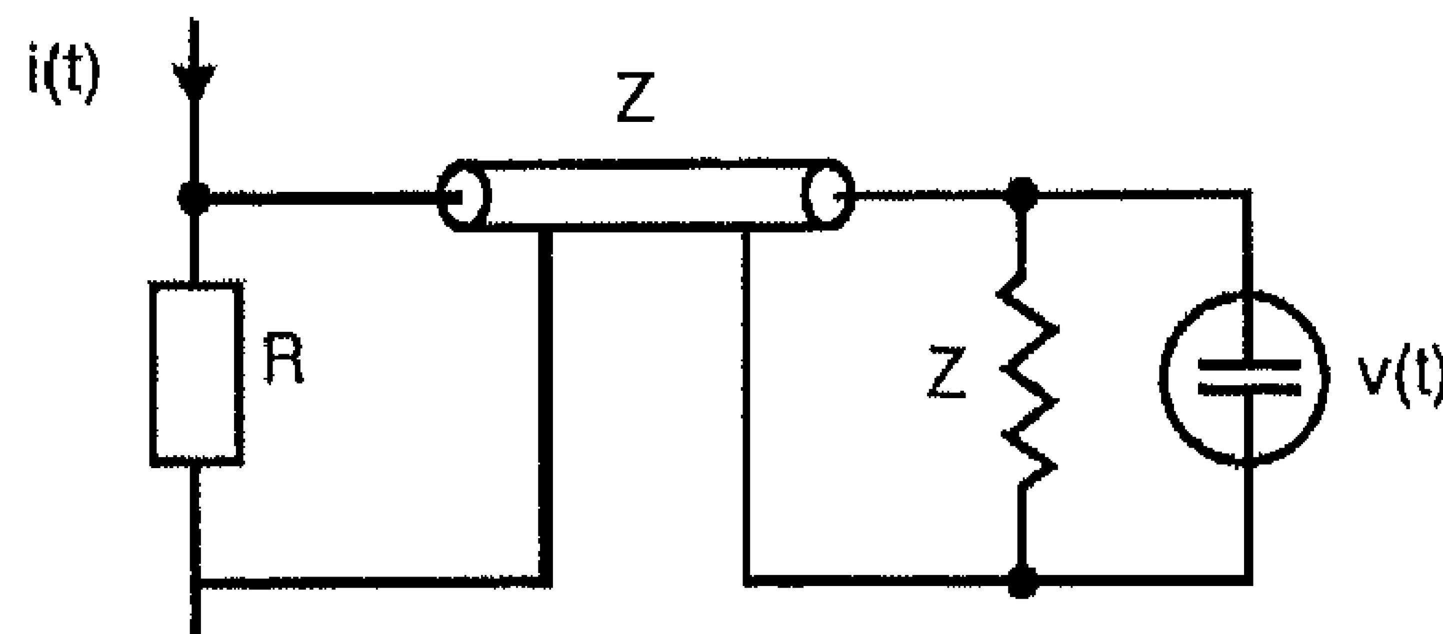
١. دوائر توازي مقاومة resistive shunts.

٢. عناصر تستخدم تأثيرات حثية.

٣. أجهزة ظاهرة فاراداي وهال.

مع هذه الطرق تختلف دقة القياس ما بين %(10–1). الشكل 10.25 يوضح مخطط دائرة لأكثر الطرق استخداماً لقياس التيار النبضي العالي. حيث الجهد عبر مقاومة التوازي R الناشئ من تيار نبضي $i(t)$ يُغذى للأوسيلسكوب خلال كابل تأخير D. وينتهي كابل التأخير خلال معاوقة Z تساوي معاوقة تمور الكابل لتجنب انعكاس الجهد الذي سيقاس وبذلك نحصل على قياس فعلي للجهد. وحيث إن بعد العنصر المقاوم يكون كبيراً، فسوف يكون له محاثة متخلفة L وسعة شاردة C. ويمكن إهمال المحاثة عند التردد المنخفض ولكن عند

الترددات الأعلى فإن المفاعلة الحثية ستكون مقارنة مع مقاومة التوازي. وعادة يجب أن نأخذ في الاعتبار تأثير المحاثة والسعة فوق 1 MHz مدى قيم المقاومة يكون في حدود ما بين $10\,\mu\,\Omega$ وعدة ميللي‌أوم ويكون هبوط الجهد في حدود عدة فولتات قليلة. مقاومات التوازي المستخدمة لقياسات التيار النبضي ذات الدوام الكبير تتحقق فقط عند نفقة محسوسة لأسباب حرارية. مقاومات التوازي للتيار النبضي لدوام قصير يمكن أن تبنى مع زمن الارتفاع الذي مقداره قليل من النانوثانية. عنصر المقاومة يمكن تصنيعه من مقاوم من رقائق كربون متوازية أو مقاوم سلك محاثة منخفضة من أسلاك مقاومة متوازية أو رقائق مقاومة.



الشكل 10.25 : دائرة لقياس تيار نبضي عالي

بفرض صغر السعة الشاردة لدرجة الإهمال فإن هبوط الجهد عبر دائرة التوازي في نطاق التردد المركب يمكن أن يكتب كالآتي:

$$V(S) = I(S)(R + LS)$$

ويجب أن نلاحظ أنه لكي يكون لدينا استجابة تردد مسطحة للعنصر المقاوم فإن المحاثة الشاردة والسعة المرتبطان مع العنصر يجب أن يكونا أصغر ما يمكن. ولكي نقلل من تأثيرات المجال الشارد إلى الحد الأدنى اقترحت واستخدمت التصميمات التالية للعناصر المقاومة:

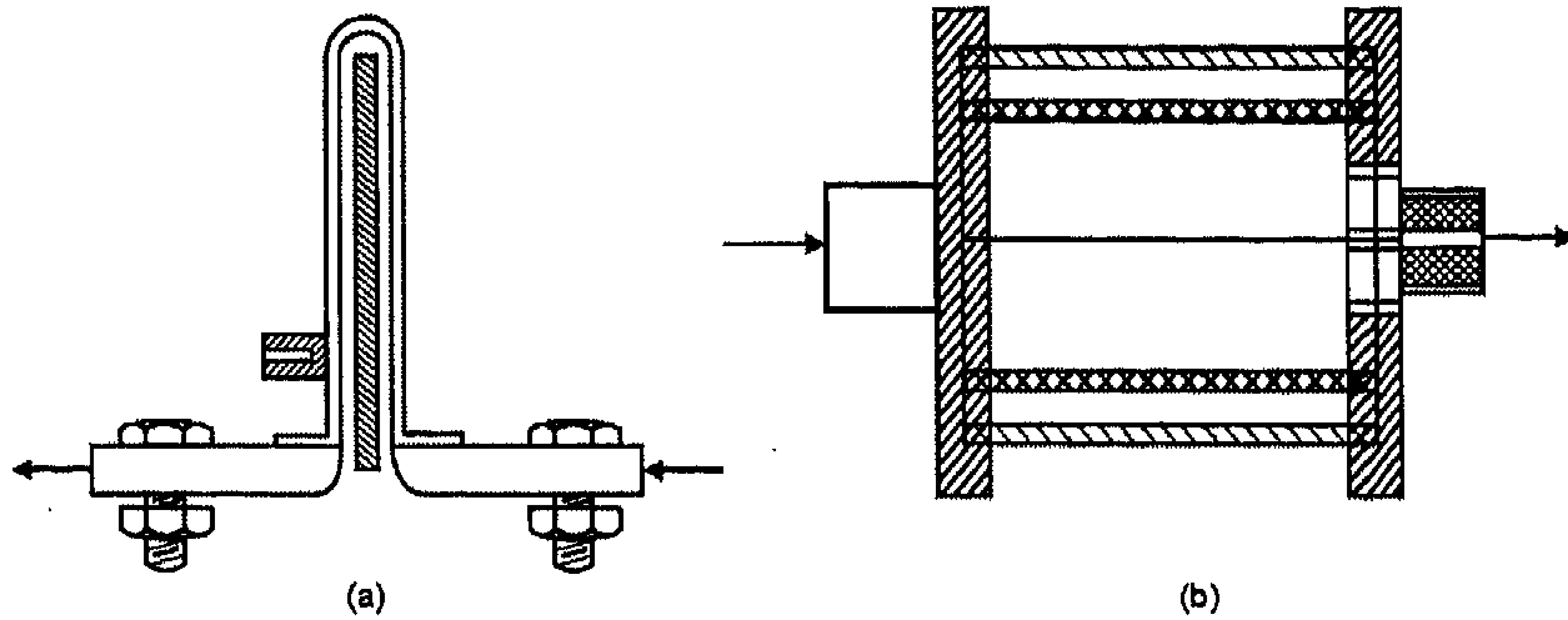
١. مقاومة التوازي مسطحة الشريط ثنائية السلك bifilar flat strip shunt.

٢. الأنبوبة متحدة المحور أو مقاومة توازي بارك coaxial tube or Park's shunt.

٣. مقاومة توازي قفص السنجاب متحدة المحور coaxial squirrel cage shunt.

وتعاني الأولى من المحاثة الشاردة المرتبطة بعنصر المقاومة وأطراف توصيل الجهد له تكون موصلة بجزء صغير من الفيض المغنطيسي المتولد بواسطة التيار المقاس. ولكي نمنع هذه المشاكل، تم تطوير مقاومات التوازي متحدة المحور [الشكل 10.26]. وهنا يدخل التيار الاسطوانة الداخلية لعنصر التوازي ويرجع خلال الاسطوانة الخارجية. ويحتل الفراغ بين الاسطوانتين

بالهواء الذي يعمل كعازل تام. ويقاس هبوط الجهد عبر العنصر بين نقطة التقاط الجهـد والغطـاء الخـارجي. اسـتجابة الـتردد لهـذا العنـصر تكـون ذو خـصائص مـسطحة غالباً حتـى حـوالي 1000 MHz وزمن الاستجابة يكون قليل من النانوثانيـة. ويحكـم حـد الـتردد الأعلـى بواسـطة الظاهرة السطحية skin effect في العنصر المقاوم.



الشكل 10.26 : (a) شريط مسطح مزدوج السلك؛ (b) قفص سنجاب متحد المحور

مقاومات التوازي قفص السنجاب هي مقاومات أومية يمكـن أن تبـدد طاقـات أكـبر مقارنـة بمقاومات التوازي متحدة المركز غير المناسبة بسبب قيود تبديد الحرارة، سمـك الجـدران الأكـبر والظاهرة السطحية. وتتكون مقاومات توازي قفص السنجاب من أعمدة معدنية سميكة أو شـرائط موضوعة حول محيط اسطوانة والتركيب يشبه تركيب العضو الدوار لمحرك حثـي مـزدوج قفـص السنجاب. استجابة الخطوة للعنصر تكون ذروية ولذلك تستخدم شبكة تعويض مرتبطة بالعنـصر لتحسين استجابة التردد له. أزمنة الارتفاع أقل من 8 n sec. وعرض النطاق 400 MHz معها.

١٠-٩-٥ العناصر التي تستخدم تأثيرات الحث Elements Using Induction Effects

إذا كان التيار المقاس يسري خلال موصل محاط بملف كما هو مبين في الشكل 10.27، M هي المحاثة المتبادلة بين الملف والموصل، فإن الجهد عبر أطراف الملف سيكون:

$$v(t) = M\frac{di}{dt}$$

وعادة يكون الملف ملفوف على قالـب تـشكيل حلقـي غـير مغنطيـسي ولـه عـدد كـبير مـن اللفات، ليكون له جهد مستحث يكفي للتسجيل. ويكون الملف متصالب اللف لتخفيض محاثـة التسرب. إذا كانت N هي عدد لفات الملف، A هي مساحة الملـف، l_m متوسـط طولـه فـإن المحاثة المتبادلة mutual inductance تعطى كالتالي:

$$M = \frac{\mu_0 N A}{l_m}$$

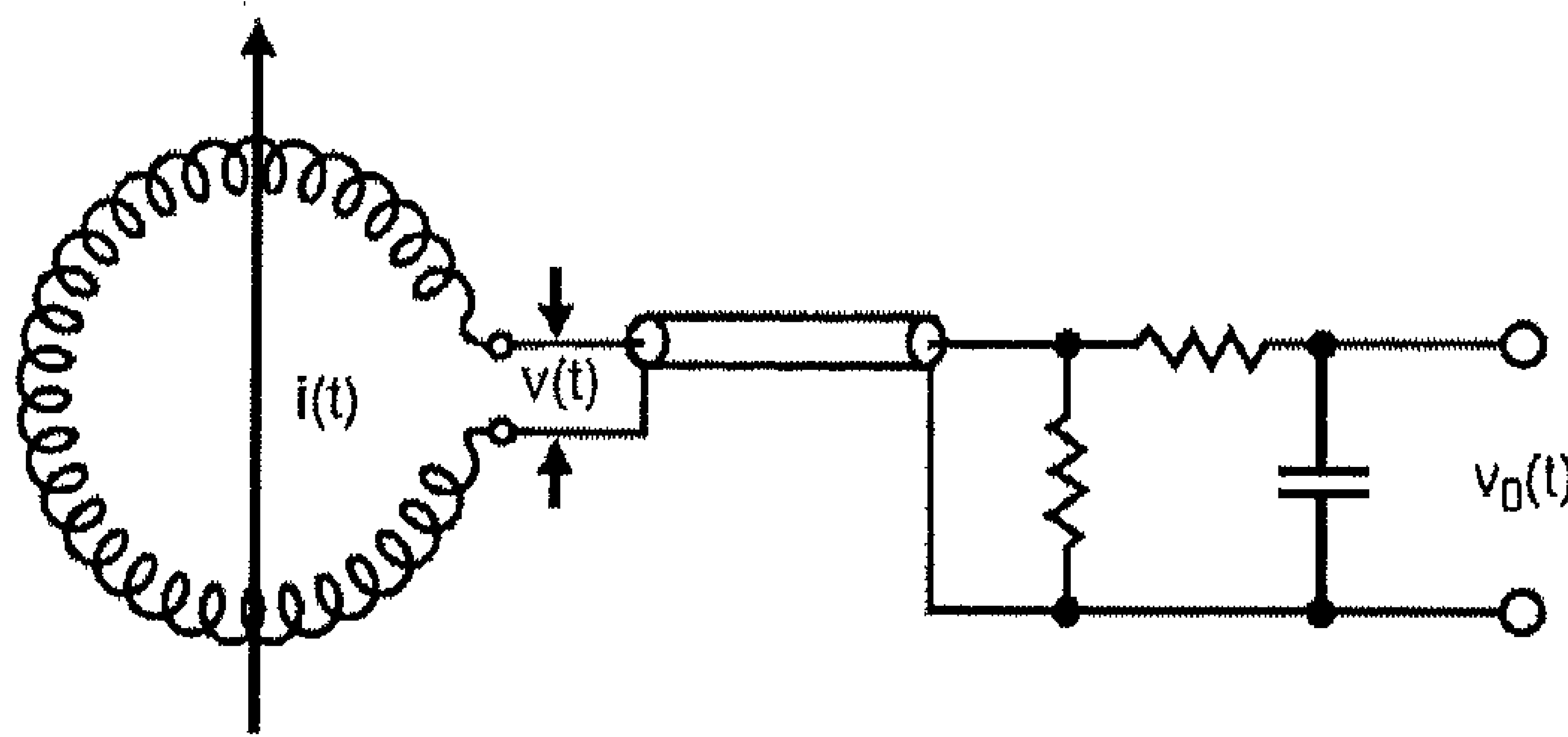
وعادة تستخدم دائرة تكاملية RC كما هو موضح في الشكل 10.27 للحصول على جهد خرج متناسب مع التيار المقاس. ويعطى جهد الخرج $v_0(t)$ كالآتي:

$$v_0(t) = \frac{1}{RC}\int_0^t v(t)dt = \frac{1}{RC}\int M\frac{di}{dt}\cdot dt = \frac{M}{RC}\int di = \frac{M}{RC}i(t)$$

أو

$$i(t) = \frac{RC}{M}v_0(t)$$

ويمكن تنفيذ تكامل $v(t)$ باستخدام مكبر تشغيلي من الأسلاك. استجابة التردد للملف روجووسكي Rogowski coil يكون مسطحاً حتى 100 MHz ولكنه بعد ذلك يتأثر بواسطة المجالات الشاردة الكهربية والمغنطيسية وأيضاً بالظاهرة السطحية.



الشكل 10.27: ملف روجووسكي لقياسات التيار النبضي العالي

الوصلات المغنطيسية Magnetic Links

وهي تستخدم لقياس مقدار ذروة التيار المار في موصل. وهذه الوصلات تتكون من عدد صغير من شرائح الصلب القصيرة ذات المحتفظية العالية high retentivity. وتركب الوصلة عند مسافة معروفة من الموصل الحامل للتيار. وقد وجد من خلال التجارب أن المغنطيسية المتبقية في الوصلة بعد تيار نبضي ذات شكل 0.5/5 μ sec. يمر خلال الموصل يكون مماثل لذلك الحادث بواسطة تيار مستمر له نفس القيمة الذروية. قياس المتبقى المملوك بواسطة الوصلة بعد مرور التيار النبضي خلال الموصل يمكننا من حساب قيمة ذروة التيار. ومن أجل القياسات الدقيقة، يركب عادة وصلتان أو أكثر عند مسافات مختلفة من نفس الموصل. وبسبب بساطتها النسبية، استخدمت هذه الطريقة لقياس تيار الصواعق وخاصة على أبراج نقل الطاقة الكهربية.

ويجب ملاحظة أن الوصلات المغنطيسية تساعد في تسجيل قيمة ذروة التيار النبضي ولكنها لا تعطي أي معلومات عن شكل موجة التيار. ولهذا الغرض، تم تطوير جهاز قياس يسمى فلكورونوجراف Flucronograph يتكون من عجلة ألمنيوم يوجد حول محيطها شقوق تحتوي وصلات مغنطيسية ذات طول يكفي للإسقاط على كلا جانبي العجلة. وبدوران العجلة، تمر الوصلات بتتابع خلال زوج من الملفات الضيقة يمر خلالها التيار المراد قياسه. ويمكن تحديد التيار عند اللحظة التي تعبر فيها وصلة معينة الملف بواسطة قياس لاحق للفيض المتخلف في الوصلة –ولذلك– نحصل على منحنى لتغيير التيار مع الزمن. ويتم التحكم في مقياس رسم الزمن بواسطة سرعة دوران العجلة.

مولد هال **Hall Generator**

يمكن قياس التيارات عالية السعة a.c amplitude والنبضية بواسطة مولد هال السابق شرحه. بالنسبة لمولد هال، بالرغم من مرور تيار تحكم ثابت ينفذ بواسطة المجال المغنطيسي للتيار المراد قياسه، فإن جهد هال يكون متناسب طردياً مع التيار المقاس. وأصبحت هذه الطريقة منتشرة مع تطور أشباه الموصلات ذات القيمة العالية لثابت هال. عرض نطاق هذه الأجهزة وجد أنه حوالي 50 MHz مع أجهزة تعويض مناسبة وتغذية عكسية.

١٠-٩-٦ مولد فاراداي أو الطريقة المغنطيسية-الضوئية

Faraday Generator or Magneto Optic Method

تستخدم هذ الطرق لقياس التيار، دوران مستوى الاستقطاب في المواد بواسطة المجال المغنطيسي الذي يتناسب مع التيار [ظاهرة فاراداري]. فعند مرور شعاع ضوئي مستقطب خطياً خلال بللورة منفذة في وجود مجال مغنطيسي، يخضع مستوى استقطاب شعاع الضوء لدوران. وتعطى زاوية الدوران كالتالي:

$$\theta = \alpha B l$$

حيث $\alpha =$ ثابت للبلورة وهي دالة في الطول الموجي للضوء.

$B =$ كثافة الفيض المغنطيسي بسبب التيار المراد قياسه في هذه الحالة.

$l =$ طول البللورة.

ويوضح الشكل 10.28 مخطط للطريقة المغنطيسية–الضوئية حيث توضع بللورة C موازية للمجال المغنطيسي الناتج بواسطة التيار المراد قياسه. ويسقط شعاع ضوئي من مصدر ضوئي

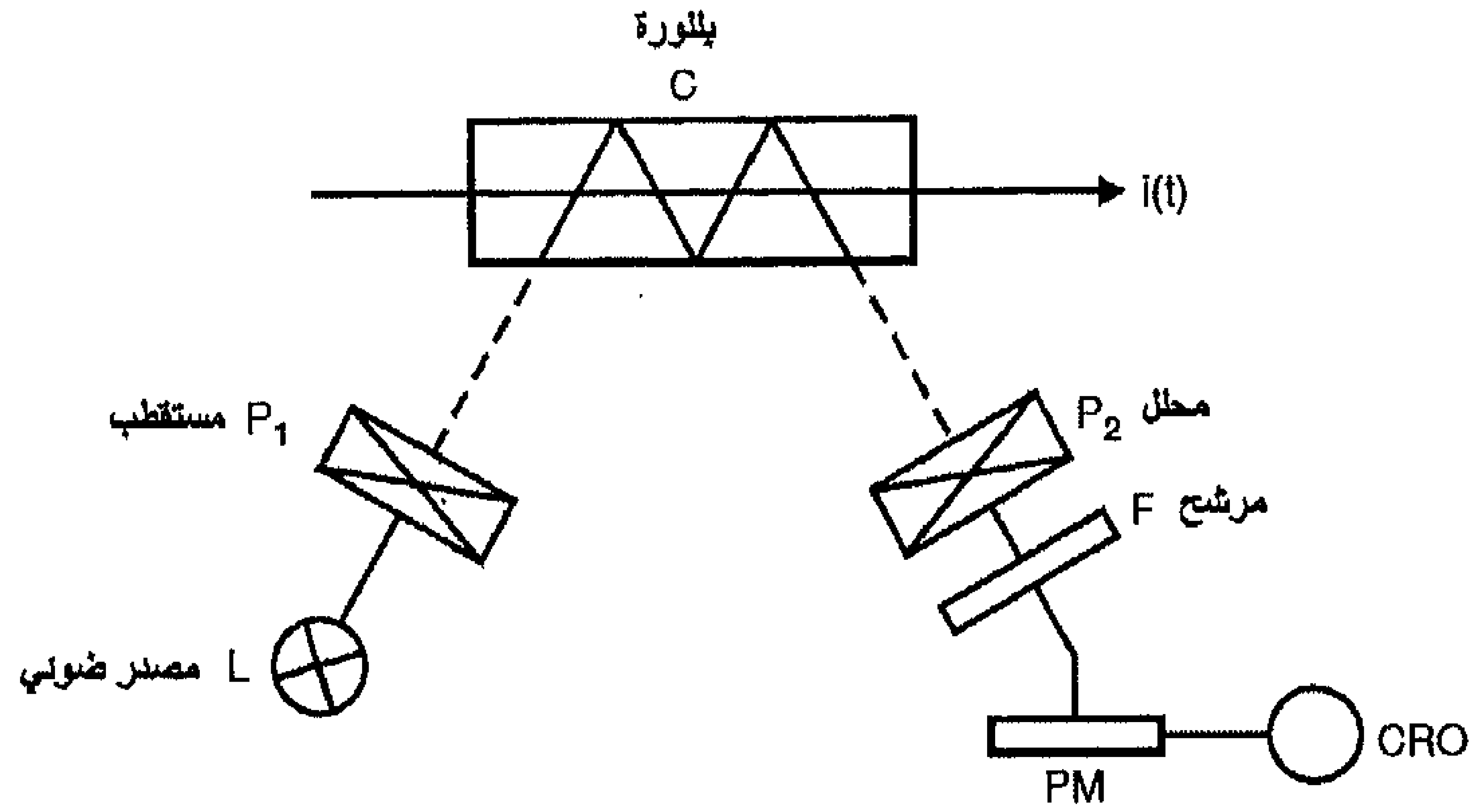
مستقر L على البللورة C بعد مروره خلال المستقطب P_1. ويخضع الشعاع الضوئي لدوران مستوى استقطابه. وبعد مرور الشعاع خلال المحلل P_2، يركز الشعاع على مضاعف ضوئي PM photomultiplier يُغذى خرجه إلى CRO. ويسمح المرشح F بمرور الضوء وحيد الطول الموجي فقط خلاله. وهناك دايودات مشعة ضوئُياً أيضاً يكون انبعاثها الضوئي متناسباً طردياً مع التيار المار خلالها، يمكن استخدامها لقياس التيار. والآتي بعد هي مميزات الطريقة:

١. تعطي عزل لمجموعة القياس عن دائرة التيار الرئيسية.

٢. غير حساسة للتحميل الزائد.

٣. حيث إن انتقال الإشارة يكون خلال نظام ضوئي فإنه لا توجد مشكلة عزل.

ومع ذلك فإن هذا الجهاز لا يعمل مع التيار المستمر d.c.



الشكل 10.28: الطريقة المغنطيسية-الضوئية لقياس التيار

أسئلة

١٠-١ ما هي مطالب ثغرة الكرة لقياس الجهود العالية؟ ناقش مميزات ثغرة الكرة للقياسات.

١٠-٢ اشرح خطوات قياس الجهود النبضية ، a.c العالية باستخدام ثغرة الكرة.

١٠-٣ ناقش تأثير:

(أ) الأشياء المؤرضة القريبة.

(ب) الرطوبة.

(ج) جسيمات الأتربة.

على القياسات باستخدام ثغرات الكرة.

١٠-٤ صف تركيب ثغرة شرر مجال منتظم. ناقش مزاياها وعيوبها لقياس الجهد العالي.

١٠-٥ اشرح مع الرسم كيف يمكن استخدام ثغرات العمود لقياس الجهود العالية.

١٠-٦ اشرح مع الرسم مبدأ تشغيل الفولتميتر الكهروستاتيكي.

١٠-٧ ارسم مخطط نظام الفولتميتر المولد واشرح مبدأ تشغيله. ناقش تطبيقاته وقيوده.

١٠-٨ ارسم دائرة شب-فورتسكيو لقياس قيمة ذروة الجهود a.c ومميزاته.

١٠-٩ ناقش المشاكل المتعلقة بدوائر فولتميتر الذروة باستخدام عناصر سلبية.

١٠-١٠ ما المشاكل المرتبطة بقياس الجهود النبضية العالية جداً؟ اشرح كيف يمكن الاهتمام بها أثناء القياس.

١٠-١١ ناقش مع المقارنة أداء كل من مقسمات جهد:

(أ) المقاومة. (ب) السعة.

وذلك لقياس الجهود النبضية.

١٠-١٢ ناقش مقسمات جهد المقاومة المختلفة وقارن أدائهم لقياس الجهود النبضية.

١٠-١٣ ناقش مقسمات جهد السعة المختلفة وقارن أدائهم لقياس الجهود النبضية.

١٠-١٤ ارسم دائرة مكافئة مبسطة لمقسم جهد مقاومة وناقش استجابة الخطوة له.

١٠-١٥ ناقش الطرق المختلفة لقياس التيارات العالية d.c، a.c.

١٠-١٦ ناقش الطرق المختلفة لقياس التيارات العالية النبضية.

١٠-١٧ ما ملف روجووسكي؟ اشرح مع الرسم مبدأ تشغيله لقياس التيارات النبضية العالية.



اختبارات الجهد العالي للمعدات الكهربية

High Voltage Testing of Electrical Equipment

١١-١ مقدمة Introduction

كان الإنسان جائعاً للقدرة منذ الزمن القديم. وفي الأزمنة الحديثة رأى العالم ظاهرة الزيادة في طلب الطاقة، ومن بينها مكون هام هو الطاقة الكهربية. إنتاج الطاقة الكهربية في وحدات كبيرة تحت أقصى الشروط الاقتصادية جعل من الضروري نقل طاقة كبيرة عبر مسافات طويلة جداً. لذلك، فإن النقل عند جهود عالية جداً وإقامة أنظمة يمكن أن تمتد عبر كل القارات أصبحت المشاكل الأكثر إلحاحاً في الحل في المستقبل القريب. وقد تبع التطور السريع جداً للأنظمة بدراسات المعدات وظروف الخدمة المطلوب الوفاء بها. هذه الظروف والشروط ستحدد أيضاً قيم الاختبار عند جهود a.c، d.c ونبضية تحت شروط محددة.

وكلما اتجهنا إلى جهود تشغيل أعلى وأعلى [ولنقل فوق 1000 kV] ترتبط مشاكل معينة مع تقنيات الاختبار. بعضها هو الآتي:

١. أبعاد معامل اختبار الجهد العالي.

٢. خواص معدات هذه المعامل.

٣. بعض الجوانب الخاصة لتقنيات الاختبار عند الجهود فائقة الارتفاع.

أبعاد المعامل لمعدات اختبار 750 kV وما فوقها تثبت بالاعتبارات الرئيسية التالية:

١. قيم جهود الاختبار تحت الشروط المختلفة.

٢. أحجام معدات الاختبار للجهود a.c، d.c والنبضية.

٣. المسافات بين الهدف تحت الجهد العالي أثناء فترة الاختبار والمحيطات المؤرضة مثل

الأرضيات، الجدران وأسقف المباني. المشاكل المرتبطة مع خصائص المعدات المستخدمة للاختبار ملخصه هنا.

في نظام الجهد المتردد، يكون الاختيار الدقيق لخصائص محول الاختبار أساسياً. من المعروف أن جهد الشرر لعازل في الهواء أو في أي عازل مائع يعتمد على سعة نظام الإمداد. ويرجع ذلك إلى حقيقة أن هبوط الجهد يمكن أن لا يحفظ تفريغ أو انهيار. ولذلك، يُقترح ضرورة توصيل سعة 1000 pF على الأقل عبر العازل للحصول على جهد شرر أو تثقب صحيح وأيضاً تحت شرط الانهيار فإن نظام الإمداد يجب أن يكون قادراً على إمداد 1 A على الأقل للعوازل النظيفة، 5 A للعوازل الملوثة عند جهد الاختبار.

توجد بعض المشاكل الصعبة مع معدات اختبار النبض وأيضاً عند اختبار محولات القدرة الكبيرة أو المعاملات الكبيرة أو الكابلات الكبيرة التي تشغل عند جهود عالية جداً. السعة المكافئة للمولد النبضي تكون عادة حوالي 40 nF ومستقلة عن جهد التشغيل الذي يعطي طاقة مخزنة حوالي $\frac{1}{2}\times 40\times 10^{-9}\times 36\times 10^{9} = 720\ \text{kJ}$ للمولدات 6 MV المطلوبة لمعدات الاختبار المشغل عند 150 kV . ليس من الصعب إطلاقاً تكديس عدد كبير من السعات لشحنهم على التوازي ثم تفريغهم على التوالي للحصول على موجة نبضية مرغوبة. ولكن الصعوبة توجد في تخفيض المفاعلة الداخلية للدائرة لذلك يمكن الحصول على جبهة موجة قصيرة مع أدنى ذبذبة. فمثلاً بالنسبة لدائرة 4 MV فإن محاثة الدائرة تكون حوالي 140 μH ويكون من المستحيل اختبار معدة مع سعة 5000 pF مع زمن أمامي .1.2 μ sec وأقل من 5% تجاوز على جبهة الموجة.

وتستخدم المقومات المتعاقبة لاختبار الجهد العالي d.c. وهناك اعتبار ضروري عند الاختبار على عزل ملوث حيث يتطلب تيارات mA (50–200) ولكن يحدث تدفق قبل التفريغ حوالي A (0.5–1) أثناء قليل من الميللي‌ثانية. المولد يجب أن يكون له مفاعلة داخلية لكي نحفظ جهد الاختبار بدون هبوط جهد عالي جداً.

١١-٢ اختبار عوازل الخط العلوي [الهوائي] Testing of Overhead Line Insulators

الأنواع المختلفة من عوازل الخط العلوي هي:

١. الطراز المسماري.
٢. طراز العمود.
٣. وحدة عزل السلسلة.

٤. سلسلة عازل التعليق. ٥. عازل الشد.

ترتيب العوازل للاختبار Arrangement of Insulators for Test

وحدة عازل السلسلة يجب أن تعلق بواسطة عين تعليق من ذراع مستعرض معدني مؤرض. ويؤثر جهد الاختبار بين الذراع المستعرض والموصل المعلق رأسياً من الجزء المعدني على الجانب السفلي من وحدة العازل.

سلسلة التعليق مع كل ملحقاتها كما في الخدمة يجب أن تعلق من ذراع مستعرض معدني مؤرض. طول الذراع المستعرض يجب أن يكون 1.5 مرة من طول السلسلة المختبرة على الأقل ويجب أن يساوي 0.9 m على الأقل على كل من جانبي محور السلسلة. ويجب عدم تواجد أي شيء مؤرض بالقرب من سلسلة العوازل عن 0.9 m أو 1.5 مرة من طول السلسلة مهما كبرت. موصل ذات الحجم الفعلي المستخدم في الخدمة أو ذات قطر لا يقل عن 1 cm وطول 1.5 مرة من طول السلسلة يعلق بإحكام في مثبت التعليق ويجب أن يقع في مستوى أفقي. ويؤثر جهد الاختبار بين الموصل والذراع المستعرض ويتم التوصيل من المولد النبضي مع طول سلك بطرف واحد من الموصل. ولجهود التشغيل الأعلى حيث يكون طول السلسلة كبيراً، ينصح بالتضحية بطول الموصل كما نص عليه سابقاً. وكبديل، يمكن انحناء أطراف الموصل بنصف قطر كبير.

بالنسبة لعوازل الشد فإن الترتيبات مشابهة لعوازل التعليق فيما عدا أنها يجب أن تمسك في وضع أفقي تقريباً تحت شد مناسب [حوالي 1000 kg].

ولاختبار العوازل المسمارية أو طراز العمود، فإنها يجب أن تركب على مسمار عازل أو ساق عمود خط كما ستستخدم في الخدمة. ويجب أن يثبت المسمار أو الساق في وضع رأسي على ذراع مستعرض معدني مؤرض وأفقي موجود على بعد 0.9 m فوق أرضية المعمل. ثم يُمد موصل قطره 1 cm أفقياً في الشق العلوي للعازل ويحكم ربطه بربطة واحدة على الأقل بسلك رباط، قطره لا يقل عن 0.3 cm في مكان سلك الرباط. طول السلك يجب أن يكون 1.5 مرة على الأقل من طول العازل. ويؤثر جهد الاختبار على طرف واحد من الموصل.

اختبار الجهد العالي للمعدات الكهربية يتطلب نوعان من الاختبارات:

١. اختبارات الطراز. ٢. الاختبار الروتيني.

اختبارات الطراز تشمل اختبار جودة المعدة عند مستوى التصميم والتطوير، أي تؤخذ عينات من المنتج وتختبر عند تطوير منتج جديد أو عند إعادة تصميم منتج قديم وتطويره بينما

الاختبارات الروتينية مخصصة لاختبار جودة قطع الاختبار منفردة. وينفذ ذلك لضمان الجودة والعول للأجهزة المختبرة.

وتشمل اختبارات الجهد العالي:

١. اختبارات تردد القدرة.
٢. الاختبارات النبضية.

وتنفذ هذه الاختبارات على كل العوازل:

١. اختبار الشرر النبضي الجاف 50% .
٢. اختبار الصمود النبضي.
٣. اختبار الشرر الجاف واختبار الدقيقة الواحدة الجاف.
٤. اختبار الشرر المبلل واختبار المطر دقيقة واحدة.
٥. اختبار دورة درجة الحرارة.
٦. الاختبار الكهروميكانيكي.
٧. الاختبار الميكانيكي.
٨. اختبار المسامية.
٩. اختبار الثقب.
١٠. الاختبار الميكانيكي الروتيني.

وسنشرح باختصار هذه الاختبارات وهي كالآتي:

١. ينفذ الاختبار على عازل نظيف مركب في شروط العمل العادية. يؤثر جهد نبضي ذات شكل موجة وسعة .1/50 µ sec يمكن أن يحدث شرر للعازل 50%، أي من النبض المؤثر 50% من النبضات يجب أن تسبب شرر. ثم تعكس قطبية النبضة وتكرر الإجراءات. ويجب تواجد 20 تأثير للنبض على الأقل في كل حالة ويجب أن لا يُدمر العازل. مقدار الجهد النبضي يجب أن لا يكون أقل من المحدد في المواصفات القياسية.

٢. يتعرض العازل إلى نبض قياسي ذات موجة .1/50 µ sec من القيمة المحددة تحت شروط جافة من كل من القطبية الموجبة والسالبة. وإذا لم تسبب خمسة تأثيرات متعاقبة أي شرر أو تثقب، فإن العازل يكون قد نجح في اختبار الصمود النبضي. وإذا سبب اثنان من خمسة من التأثيرات شرراً، يكون العازل قد فشل في الاختبار.

٣. يؤثر جهد تردد قدرة على العازل ويزداد الجهد إلى قيمة محددة ويستمر لمدة دقيقة واحدة. ثم يزداد الجهد تدريجياً حتى حدوث الشرر. ثم يحدث شرر في العازل أربعة مرات على الأقل، ويرتفع الجهد تدريجياً ليصل إلى الشرر في حوالي .10 sec . متوسط خمسة جهود شرر متتالية على الأقل يجب أن لا يكون أقل من القيمة المحددة في المواصفات.

٤. إذا نفذ الاختبار تحت أمطار صناعية، فإنه يسمى "اختبار الشرر المبلل". يتعرض العازل إلى رشاش من الماء ذات الخواص التالية:

- معدل الترسيب (3±10)% mm/min .
- الاتجاه 45° to the virtical .
- موصلية الماء 100 µ siemens ±10% .
- درجة حرارة الماء 15°C +.

العازل ذات 50% من أمطار دقيقة واحدة يؤثر عليه الجهد، ثم يرش لمدة دقيقتان، يرفع الجهد إلى جهد اختبار دقيقة واحدة في حوالي 10 sec. تقريباً، ويبقى هكذا لمدة دقيقة واحدة. ثم يزداد الجهد تدريجياً حتى يحدث الشرر ويحدث الشرر أربعة مرات على الأقل، الزمن المأخوذ ليصل إلى جهد الشرر في كل مرة حوالي 10 sec. . جهد الشرر يجب أن لا يكون أقل من القيمة المحددة في المواصفات.

٥. يغمر العازل في حمام ماء ساخن درجة حرارته 70°C أعلى من حمام الماء العادي لمدة T دقيقة. ثم يخرج ويغمر في الحال في حمام ماء عادي لمدة T دقيقة. بعد T دقيقة يغمر العازل مرة ثانية في حمام ماء ساخن لمدة T دقيقة. وتكرر الدورة ثلاث مرات ويتوقع أن العازل سيصمد للاختبار دون أن يدمر. وهنا تكون:

$$T = \left(15 + \frac{W}{1.36}\right)$$

حيث W= وزن العازل (kg).

٦. ينفذ الاختبار على عوازل التعليق أو الشد فقط. ويتعرض العازل إلى 2.5 مرة من أقصى شد محدد ويبقى لمدة دقيقة واحدة. أيضاً، يتم التأثير آنياً 75% من جهد الشرر الجاف. ويجب أن يقاوم العازل هذا الاختبار بدون أي تدمير.

٧. وهذا اختبار حناية bending test يطبق على العوازل المسمارية والعمودية. ويُعرض العازل لحمل مقداره ثلاثة أمثال أقصى حمل كسر محدد لدقيقة واحدة. ويجب أن لا يكون هناك تدمير للعازل وفي حالة عازل العمود يجب أن يكون الأثر الدائم أقل من 1% . ومع ذلك، ففي حالة عازل العمود، يرفع الحمل إلى ثلاثة أمثال ويجب عدم وجود أي تدمير للعازل ومسماره.

٨. يكسر العازل ويغمر في محلول كحولي 0.5% تحت ضغط $13800\ kN/m^2$ لمدة 24 ساعة. العازل المكسور يستبعد ويجب عدم وجود أي علامة للتشرب.

٩. يؤثر جهد زائد نبضي بين المسمار ورقيقة الرصاص المقيدة فوق القمة والشقوق الجانبية في حالة عازل المسمار والعمود وبين التركيبات المعدنية في حالة عوازل التعليق. ويكون الجهد موجة $1/50\ \mu$ sec. مع سعة ضعف جهد الشرر النبضي 50% وقطبية سالبة. ويؤثر حوالي 20 من هذه التأثيرات. وتكرر الإجراءات 3.5، 3، 2.5 مرة مثل جهد الشرر النبضي 50% وتستمر حتى يتثقب العازل. العازل يجب ألا يثقب إذا كان الجهد المؤثر مساوياً لذلك المحدد في المواصفات.

١٠. يُعلق عازل السلسلة رأسياً أو أفقياً ويؤثر حمل شد أكبر بـ 20% من أقصى حمل عامل محدد لمدة دقيقة واحدة ويجب عدم حدوث أي تدمير للسلسلة.

١١-٣ اختبار الكابلات Testing of Cable

أثبتت كابلات القدرة عالية الجهد فعاليتها وفائدتها وخاصة في حالة نقل الجهد العالي d.c. التوزيع تحت الأرض باستخدام الكابلات لم يضف منظر جمالي للعواصم فقط بل أعطى بيئة أفضل وإمدادات يُعتمد عليها للمستهلكين.

تجهيز عينة الكابل Preparation of Cable Sample

يجب أن تجهز عينة الكابل بعناية لأداء الاختبارات المختلفة وخاصة الاختبارات الكهربية. وهذا أساسي لتجنب أي تسرب زائد أو شرر طرفي يمكن أن يحدث أثناء الاختبار وبالتالي يمكن أن يعطي معلومات خاطئة تتعلق بجودة الكابلات. ويختلف طول عينة الكابل بين 50 cm إلى 10 m . وتصنع النهايات عادة بواسطة تحجيب أطراف الكابل بأحجبة إجهاد لتصريف الأطراف من الإجهادات الكهربية العالية الزائدة. ويتعرض الكابل للاختبارات التالية:

١. اختبارات الحناية.
٢. اختبار دورة التحميل.
٣. اختبار الاستقرار الحراري.
٤. اختبار المقاومة الحرارية للعازل الكهربي.
٥. اختبار توقع العمر.
٦. اختبار معامل قدرة العازل الكهربي.
٧. اختبار جهد صمود تردد القدرة.
٨. اختبار جهد الصمود النبضي.
٩. اختبار التفريغ الجزئي.

وسنناقش هذه الاختبارات كالتالي:

١. يجب ملاحظة أن اختبار الجهد يجب أن ينفذ قبل وبعد اختبار الحناية bending test. ويحني الكابل حول اسطوانة ذات قطر محدد ليعمل لفة واحدة كاملة. ثم يفك ويعاد لفه في الاتجاه المعاكس. وتكرر الدورة ثلاث مرات.

٢. يتعرض إطار اختبار، يتكون من كابل وملحقاته إلى 20 دورة حمل مع أدنى درجة للموصل 5°C ويمد الكابل بالطاقة إلى 1.5 مثل جهد التشغيل. ويجب أن لا يُظهر الكابل أي أثر للتدمير.

٣. بعد الاختبار (٢) يُمد الكابل بجهد يماثل 1.5 مرة جهد التشغيل للكابل المقنن بـ 132 kV ويضبط تيار التحميل بحيث تكون درجة حرارة قلب الكابل أعلى من درجة الحرارة المسموحة المحددة بمقدار 5°C . ويجب أن يبقى التيار عند هذه القيمة لمدة ست ساعات.

٤. نسبة فرق درجة الحرارة بين قلب وغلاف الكابل والحرارة المتدفقة من الكابل تعطي المقاومة الحرارية لعينة الكابل. ويجب أن تكون داخل الحدود المحددة في المواصفات.

٥. لكي نقدر عمر الكابل، ينفذ اختبار عمر معجل وذلك بتعريض الكابل لإجهاد فولت أعلى من الإجهاد العادي المشغل. وقد لوحظ أن العلاقة بين العمر المتوقع للكابل بالساعات وإجهاد الفولت يعطى كالتالي:

$$g = \frac{K}{n\sqrt{t}}$$

حيث K = ثابت يعتمد على المادة.

n = دليل [معامل] العمر، وهو يعتمد مرة ثانية على المادة.

٦. تستخدم قنطرة شيرنج للجهد العالي لتنفيذ معامل قدرة العزل على عينة الكابل. ويقاس معامل القدرة لقيم مختلفة من الجهود مثلاً 0.5، 1.0، 1.5، 2.0 مرة مثل جهد التشغيل المقنن. القيمة العظمى لمعامل القدرة عند جهد التشغيل العادي لا تتعدى القيمة المحددة [عادة 0.01] عند سلسلة من درجات الحرارة تتراوح بين (15–65)°C. الفرق في معامل القدرة بين الفولت المقنن، 1.5 مرة قدر الفولت المقنن والفولت المقنن وضعف الفولت المقنن لا تتعدى قيمة محددة. أحياناً يكون المصدر غير قادر على إمداد تيار الشحن المطلوب بواسطة كابل الاختبار، ويساعد خانق مناسب على التوالي مع كابل الاختبار في التخلص من هذا الموقف.

٧. تختبر الكابلات للجهود a.c، d.c لتردد القدرة. أثناء التصنيع يمر الكابل كله خلال اختبار جهد أعلى وجهد مقنن لاختبار استمرارية الكابل. كاختبار روتيني يتعرض الكابل لفولت يساوي 2.5 مرة من فولت التشغيل لمدة 10 دقائق بدون تدمير عزل الكابل. يؤثر d.c HV يساوي 1.8 مرة الجهد d.c المقنن ذات القطبية السالبة لمدة 30 دقيقة. ويقال إن الكابل قد صمد للاختبار إذا لم يحدث انهيار للعزل.

٨. يتعرض الكابل المختبر لجهد نبضي 10 موجب، 10 سالب كما هو محدد في المواصفات، ويجب أن يصمد الكابل لخمسة تأثيرات بدون أي تدمير. عادة –بعد الاختبار النبضي– ينفذ اختبار معامل قدرة العازل لتردد القدرة للتأكد من عدم حدوث أي فشل أثناء الاختبار النبضي.

٩. قياس التفريغ الجزئي للكابلات يكون مهم جداً حيث يعطي مؤشراً للعمر المتوقع للكابل ويعطي مكان العطل في الكابل إذا وجد.

عندما يتعرض كابل لجهد عالي وإذا وجدت فراغات في الكابل، فإن الفجوة أو الفراغ ينكسر ويحدث التفريغ. ونتيجة لذلك، يوجد سقوط مفاجئ في الفولت على هيئة نبض. هذا النبض يرحل بطول الكابل. فترة الدوام بين النبضة العادية ونبضة التفريغ تقاس على الأوسيليسكوب وهذه المسافة تعطي مكان الفجوة من طرف اختبار الكابل. ومع ذلك، يعطي شكل الموجة طبيعة وشدة التفريغ.

ولكي نمسح كل طول الكابل من أجل الفجوات أو العيوب الأخرى، يمرر خلال أنبوبة من مادة عازلة مملوءة بماء مقطر. أربعة إلكترودات، اثنان عند الطرفين واثنان في منتصف الأنبوبة تكون مرتبة. والإلكترودات الوسطى يكون موضعها عند مسافة مشروطة وتمد بالطاقة مع جهد عالي. إلكترودا الطرفان وموصلا الكابل يكونا مؤرضان. وعند مرور الكابل بين إلكترودي الوسط، إذا رأينا التفريغ على الأوسيليسكوب، فإنه يكون هناك عيب في هذا الجزء من الكابل وبالتالي يزال هذا الجزء من الكابل عن بقيته.

١١-٤ اختبار الجلب Testing of Bushings

الجلب هي مكون مكمل لآلات الجهد العالي. وتستخدم الجلبة لإحضار موصلات الجهد العالي خلال خزان مؤرض أو جسم معدة كهربية بدون تدرجات جهد مفرطة بين الموصل وحافة الثقب في الجسم. وتمتد الجلبة إلى داخل سطح الزيت عند أحد الأطراف والطرف الآخر يحمل فوق

الخزان إلى ارتفاع يكفي لمنع الانهيار بسبب تسرب السطح. وتجرى الاختبارات التالية على الجلب:

اختبار معامل القدرة Power Factor Test

تركب الجلبة كما في الخدمة أو تغمر في الزيت. ويوصل طرف الجهد العالي للجلبة بطرف الجهد العالي لقنطرة شيرنج ويوصل الخزان أو الجزء الأرضي للجلبة بكاشف القنطرة. وتقاس السعة ومعامل قدرة الجلبة عند جهود مختلفة كما هو محدد في المواصفات ويجب أن تكون السعة ومعامل القدرة داخل المدى المحدد.

اختبار الصمود النبضي Impulse Withstand Test

تتعرض الجلبة لموجات نبضية من كلا القطبيتين كما هو محدد في المواصفات القياسية. وتؤثر خمسة موجات كاملة متتابعة ذات شكل موجة قياسي 1/50 µ sec. إذا تسبب اثنان منهما في حدوث الشرر، يقال أن الجلبة معيبة. وإذا حدث شرر واحد فقط، تنفذ التأثيرات الإضافية. فإذا لم يحدث شرر، فإن الجلبة تكون قد نجحت في الاختبار.

اختبار الموجة المشطورة وتمور تشغيل المفاتيح Chopped Wave & Switching Surge Test

تنفذ اختبارات الموجة المشطورة وتمور تشغيل المفاتيح ذات الدوام المناسب على جلب الجهد العالي. والخطوات تكون مماثلة للطريقة السابقة.

اختبار التفريغ الجزئي Partial Discharge Test

لكي نحدد ما إذا كان يوجد تدهور للعزل المستخدم في الجلبة من عدمه، ينفذ هذا الاختبار. شكل التفريغ يكون مؤشراً لطبيعة وخطورة عيب الجلبة. ويعتبر هذا اختبار روتيني للجلب عالية الجهد.

اختبار التفريغ المرئي عند تردد القدرة Visible Discharge Test at Power Frequency

ينفذ هذا الاختبار للتأكد من أن الجلبة المعطاة ستعطي ارتفاعاً لتداخل الراديو أم لا أثناء التشغيل. وينفذ الاختبار في حجرة مظلمة. يؤثر الجهد المحدد على الجلبة IS2099. ولا يجب رؤية أي تفريغ خلاف ذلك الناشئ من حلقات التدريج أو أبواق التقوس.

اختبار شرر تردد القدرة أو التثقب Power Frequency Flashover or Puncture Test

تكون الجلبة إما مغمورة بالكامل في الزيت أو مركبة كما في شروط الخدمة. وينفذ هذا الاختبار

للتأكد من أن متانة الانهيار الداخلي للجلبة يكون أكبر 15% من قيمة اختبار الصمود الجاف اللحظي لتردد القدرة.

١١-٥ اختبار مكثفات القدرة Testing of Power Capacitors

مكثف القدرة هو جزء مكمل في نظام القدرة الحديث. وهي تستخدم للتحكم في بروفيل جهد النظام. وتنفذ الاختبارات التالية على مكثفات قدرة التوازي IS2834.

الاختبارات الوتيرية Routine Tests

تنفذ الاختبارات الوتيرية على كل المكثفات في مصانع إنتاجها. وأثناء الاختبار، يجب أن لا ينهار المكثف أو يتصرف على غير المعتاد أو يظهر أي تدهور مرئي.

اختبار الخرج Test of Output

يمكن استخدام أميتر وفولتميتر لقياس الـ KVAr وسعة المكثف. الـ KVAr المحسوبة يجب أن لا تختلف بأكثر من 5%− إلى 10%+ من القيمة المحددة لوحدة المكثف، (0–10)% لمجموعات المكثف.

المصدر a.c المستخدم لاختبار المكثف يجب أن يكون تردده بين Hz (6–40)، ومن المفضل قريباً ما أمكن من التردد المقنن وتكون التوافقيات دنيا.

الاختبار بين الأطراف Test Between Terminals

يتعرض كل مكثف لأحد الاختبارين التاليين لمدة 10 sec.:

١. اختبار d.c، يكون جهد الاختبار V_t هو $V_t = 4.3V_0$.

٢. اختبار a.c، يكون جهد الاختبار V_t هو $V_t = 2.15V_0$.

حيث V_0= قيمة r.m.s للجهد بين الأطراف والذي يعطي في توصيل الاختبار نفس إجهاد العزل الكهربي في عنصر المكثف مثل ما يعطيه الجهد المقنن V_n في الخدمة العادية.

الاختبار بين أطراف الخط والحاوية [لوحدات المكثف]

Test Between Line Terminals & Container [for Capacitor Units]

الجهد ذو القيمة المحددة في العمود الثاني من الجدول 11.1 تؤثر بين أطراف وحدة المكثف [مقصرة] وحاويته وتحفظ لمدة دقيقة واحدة، ويجب عدم ملاحظة أي تدمير على المكثف.

الجدول **11.1** : جهود اختبار تردد القدرة والنبض [بين الأطراف والحاوية]

جهد النظام $(kV_{r.m.s})$	جهد اختبار تردد القدرة $(kV_{r.m.s})$	جهد الاختبار النبضي (kV_{peak})
12	28	75
24	50	125
36	70	170
72.5	140	325
145	230*	550*
	275**	650**
245	395*	900*
	460**	1050**

الأرقام ذات النجمة الواحدة [في الجدول 11.1] تمثل القيم المقابلة لمستوى العزل المخفض [النظام المؤرض الفعال] وذات النجمتين تمثل مستوى العزل الكامل [النظام المؤرض غير-الفعال].

اختبار مقاومة العزل IR Test

تقاس مقاومة عزل مكثف اختبار بمساعدة ميجر megger. ويوصل الميجر بين طرف واحد للمكثف والحاوية. جهد الاختبار سيكون جهد d.c لا يقل عن 500 V والقيمة المقبولة لمقاومة العزل هي أكبر من $50\ M\Omega$.

اختبار كفاءة جهاز التفريغ Test for Efficiency of Discharge Device

لكي نمنح الأمان للأشخاص الذين سيعملون على المكثفات، مطلوب توصيل مقاومة كبيرة جداً عبر أطراف المكثف حتى تفرغ في ثواني قليلة بعد غلق مصدر الإمداد. جهد المكثف المتخلف بعد قطع جهد الإمداد يجب أن ينخفض إلى 50 V في أقل من دقيقة واحدة إذا كان المكثف مقنن حتى 650 V وخمسة دقائق إذا كان المكثف مقنن لجهد أكبر من 650 V .

جهد d.c مقداره [r.m.s الجهد المقنن للمكثف $\times\sqrt{2}$] يؤثر عبر الاتحاد التوازي لـ R ، C حيث C هي سعة المكثف تحت الاختبار، R هي المقاومة العالية الموصلة عبر المكثف. ويغلق الإمداد ويسجل الهبوط في الجهد عبر المكثف كدالة في الزمن. إذا كانت C بالميكروفاراد، R بالأوم، يمكن حساب التفريغ إلى 50 V من العلاقة الآتية :

$$t = 2.3\times10^{-6} C\, R\, (\log_{10}V - 1.7) \text{ sec.}$$

حيث V= جهد r.m.s المقنن للمكثف بالفولت.

اختبارات الطراز Type Tests

تنفذ اختبارات الطراز مرة واحدة بواسطة المُصَنّع للتأكد من أن تصميم المكثف يتطابق مع مطالب التصميم:

اختبار زاوية فقد العازل الكهربي [اختبار معامل القدرة] Dielectric Loss Angle Test [p.f. Test]

تستخدم قنطرة شيرنج للجهد العالي لقياس معامل قدرة العزل الكهربي. ويكون الجهد المؤثر هو الجهد المقنن وعند درجة حرارة $27°C \pm 2°C$. قيمة زاوية الفقد $tan\,\delta$ يجب أن لا تكون أكبر من 10% عن القيمة المتفق عليها بين الصانع والمشتري ويجب أن لا تتعدى 0.0035 لمواد تشريب الزيت المعدني، 0.005 لمواد التشريب المعاملة بالكلور.

اختبار فقد المكثف Test for Capacitor Loss

يشمل فقد المكثف فقد العزل الكهربي للمكثف وفقد V^2/R في مقاومة التفريغ الموصلة دائماً. ويمكن تقدير فقد العزل من زاوية الفقد كما حصلنا عليها في الاختبار السابق وأيضاً يمكن حساب فقد V^2/R. فقد القدرة الإجمالي يجب أن لا يزيد عن 10% من القيمة المتفق عليها بين الصانع والمشتري.

اختبار الاستقرار Stability Test

يوضع المكثف في حاوية تحفظ درجة حرارتها عند $\pm 2°C$ فوق أقصى درجة حرارة تشغيل لمدة 48 ساعة. تقاس زاوية الفقد بعد 18 ساعة، 24 ساعة، 48 ساعة باستخدام قنطرة شيرنج للضغط العالي عند التردد المقنن وعند جهد 1.2 مرة من الجهد المقنن. إذا كانت قيم زوايا الفقد كل على حدة هي $tan\,\delta_1$ ، $tan\,\delta_2$ ، $tan\,\delta_3$ فإن هذه القيم يجب أن تحقق العلاقات التالية [أي واحدة منهم]:

١. $tan\,\delta_1 + tan\,\delta_2 \leq 2tan\,\delta_2 > 2.1tan\,\delta_1$

أو

٢. $tan\,\delta_1 \geq tan\,\delta_2 \geq tan\,\delta_3$

اختبار الجهد النبضي بين الأطراف والحاوية Impulse Voltage Test Between Terminal & Container

يتعرض المكثف إلى جهد نبضي لموجة $1/50\ \mu$ sec. ومقداره كما هو مبين في العمود 3 من الجدول 11.1. ويجب أن تؤثر خمسة نبضات من أي قطبية بين الأطراف [موصلة معاً] والحاوية. ويجب أن تقاوم هذا الجهد بدون إحداث أي شرر.

١١-٦ اختبار محوّلات القدرة Testing of Power Transformers

المحول هو أحد أهم وأغلى المعدات في نظام القدرة. إذا لم يصمم جيداً فإن تعطله يمكن أن يُحدث نتائج مكلفة وطويلة الأمد. لذلك، فمن المهم جداً أن نكون حريصين أثناء تصميم عزله، حتى يصمد ضد الجهود الزائدة العابرة الناشئة من كل من تشغيل المفاتيح والصواعق. ولذلك، يكون اختبار الجهد العالي للمحولات هام جداً وسنناقشه هنا. الاختبارات الأخرى مثل ارتفاع درجة الحرارة، دائرة القصر، الدائرة المفتوحة، ...إلخ لن تعتبر هنا. ومع ذلك، يمكن أن توجد هذه في المواصفات القياسية المناسبة.

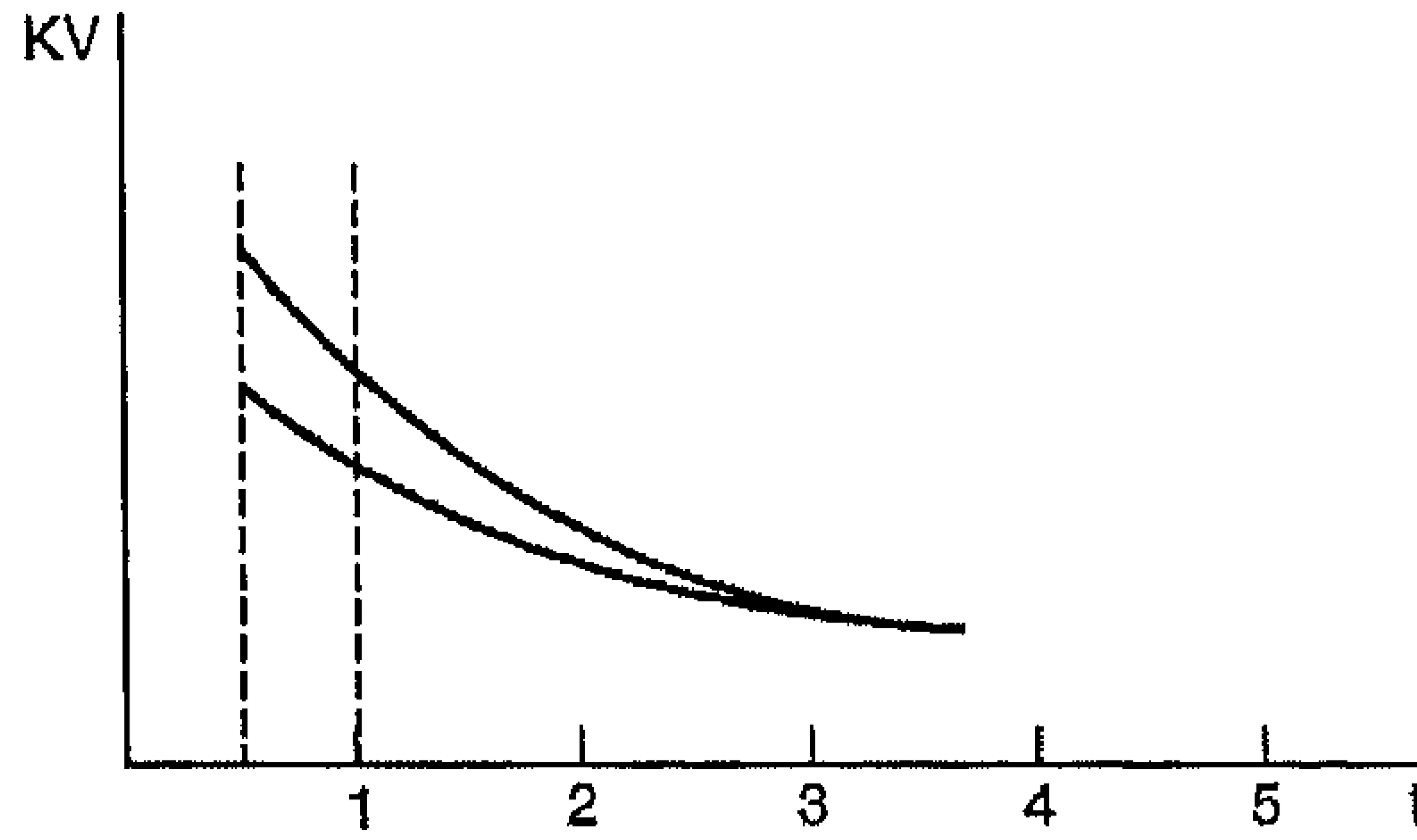
اختبار التفريغ الجزئي Partial Discharge Test

ينفذ الاختبار على لفات المحوّل لتقدير مقدار التفريغات. ويوصل المحول كعينة اختبار مماثلة لأي معدة وتتم قياسات التفريغ. مكان ومدى خطورة الأعطال تكتشف باستخدام تقنية نظرية الموجة الراحلة. القياسات تنفذ عند كل أطراف المحول ويقدر أنه إذا كانت الشحنة المقاسة الظاهرة تتعدى 10^4 بيكوكولوم، فإن مقدار التفريغ يعتبر خطيراً وعزل المحول يجب أن يصمم بحيث يجب أن يكون قياس التفريغ أقل من قيمة 10^4 بيكوكولوم.

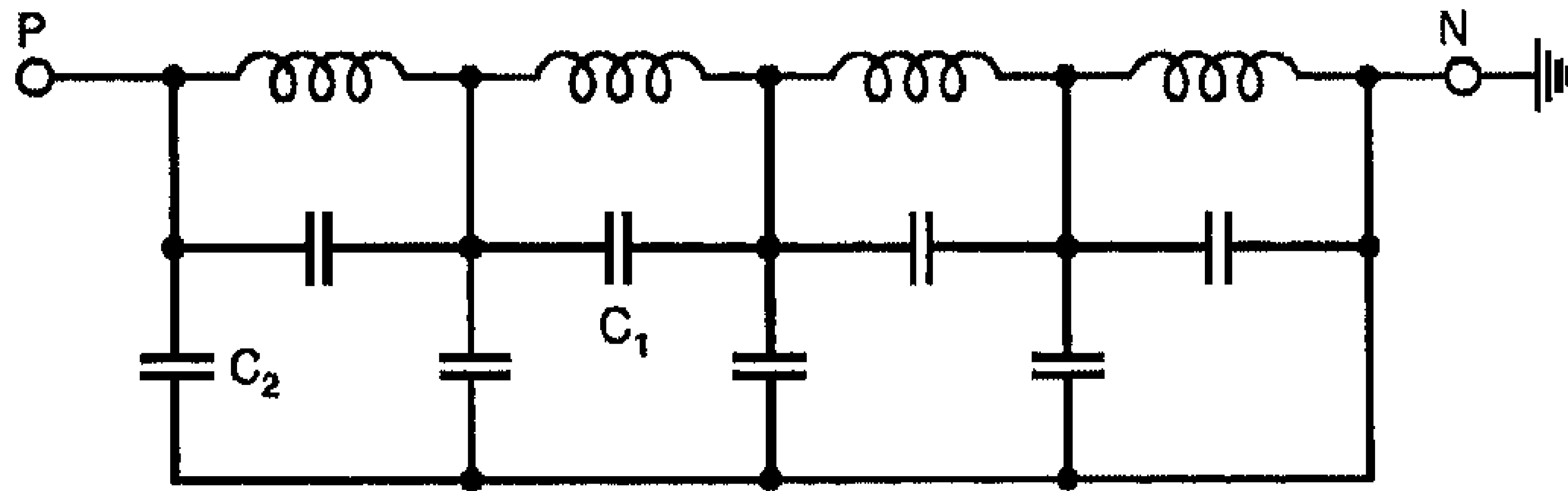
الاختبار الدفعي [النبضي] للمحول Impulse Testing of Transformer

يحدد مستوى الدفع [النبضي] لمحول بواسطة جهد الانهيار لعزله الأصغر [العزل بين لفة وبين اللفائف]، جهد الانهيار لعزله الرئيسي [العزل بين الفائف والخزان] وجهد الشرر لجلبة أو توليفة من ذلك. الخصائص الدفعية للعزل الداخلي في محول يختلف عن الشرر في الهواء من جانبين رئيسيين. الأول نسبة دفع عزل المحول تكون أعلى [تختلف من 2.1 إلى 2.2] من تلك الخاصة بالجلب [1.5 للجلب، العوازل، ...إلخ]. الثاني، الانهيار الدفعي لعزل المحول يكون عملياً ثابتاً ومستقلاً عن زمن تأثير الجهد الدفعي. الشكل 11.1 يبين أنه بعد $3\ \mu$ sec. يكون جهد الشرر ثابت. إجهاد الفولت بين لفات نفس اللفائف وبين اللفائف المختلفة للمحول تعتمد على انحدار جبهة موجة التمور. إجهاد الفولت يمكن أن يزداد تراكماً بواسطة فعل تراكم

الموجة إذا كان طول موجة التمور كبيراً. في الحقيقة، بسبب الانحدار العالي لموجات التمور، تكون اللفات القليلة الأولى للفائف زائدة الإجهاد وهذا هو السبب في أن الممارسة الحديثة هي إعطاء عزل زائد للفات القليلة الأولى للفائف. الشكل 11.2 يوضح الدائرة المكافئة للفائف محول للجهد الدفعي.



الشكل 11.1: منحنى الفولت-الزمن لعزل رئيس نموذجي في محول



الشكل 11.2: الدائرة المكافئة لمحول للجهد الدفعي

وهنا C_1 تمثل السعة بين اللفات، C_2 السعة بين اللفائف والأرض [الخزان]. لذلك فإن العزل الأصغر minor سيكون قادراً على مقاومة الجهد الدفعي، وتتعرض اللفائف لموجة دفعية مشطورة ذات جهد ذروة أكبر من الموجة الكاملة. وتنتج هذه الموجة المشطورة بواسطة شرر ثغرة العمود أو الجلب التي على التوازي مع عزل المحول. زمن الشطر يكون عادة من (3–6) µ sec. أثناء تأثير الجهد الدفعي بين طور واحد والأرض، فإن الجهود العالية ستستحث في ثانوي المحول. ولتجنب ذلك، تقصر اللفائف الثانوية وتوصل في النهاية بالأرضي. ومع ذلك، فإن التقصير يخفض من معاوقة المحول وبالتالي يمتلك مشكلة في ضبط جبهة الموجة وتوقيت ذيل الموجة. أيضاً، فإن القيمة الأدنى لسعة الدفع المطلوبة تعطى كالتالي:

$$C_0 = \frac{P \times 10^8}{Z \times V^2} \ \mu\text{F}$$

حيث P = مقنن MVA للمحول.

Z = المعاوقة المئوية للمحول.

V= الجهد المقنن للمحول.

الشكل 11.3 يبين نظام محول للاختبار الدفعي. CRO يشكل جزء مكمل من دائرة الاختبار الدفعي للمحول. ويكون مطلوب تسجيل أشكال الموجة للجهد المؤثر والتيار خلال اللفائف تحت الاختبار.

ويتكون الاختبار الدفعي من الخطوات التالية :

١. التأثير بدفع مقداره 75% من مستوى الدفع الأساسي BIL للمحول تحت الاختبار.

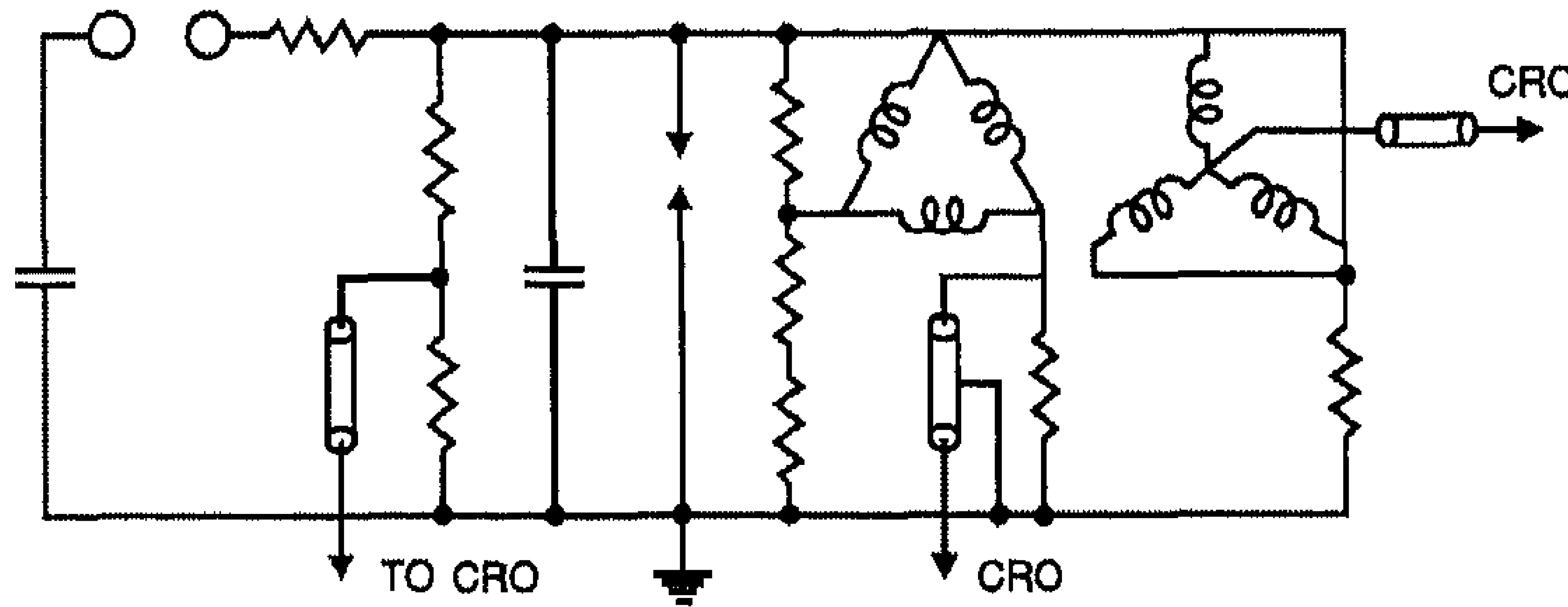
٢. موجة كاملة واحدة من 100% من BIL.

٣. موجتان مشطورتان من 115% من BIL.

٤. موجة كاملة واحدة 100% من BIL.

٥. موجة كاملة واحدة 75% من BIL.

أثناء الاختبار الدفعي يمكن تحديد مكان العطل بواسطة الملاحظة العامة مثل ضوضاء في الخزان أو دخان أو فقاعات في المُتَنَفْس.



الشكل 11.3: نظام للاختبار الدفعي لمحول

إذا وجد أي عطل، فإنه سيظهر على الأوسيليسكوب كتداعي [هبوط] جزئي أو كلي للجهد المؤثر. دراسة شكل موجة التيار المتعادل تشير أيضاً إلى نوع العطل. وإذا حدث قوس بين اللفات أو من لفة إلى الأرض، نرى قطار من النبضات عالية التردد على الأوسيليسكوب ويتغير شكل الموجة الدفعية. إذا كان تفريغ جزئي فقط، نلاحظ ذبذبات عالية التردد ولكن بدون حدوث تغير في شكل الموجة.

تشكل الجلب جزءاً هاماً ومكملاً من عزل المحول. لذلك، فإن الشرر الدفعي لها يجب أن يُدرس جيداً. متانة الدفع للفائف المحول تكون هي نفسها لكلا القطبيتين للموجة بينما جهد الشرر للجلب يكون مختلفاً باختلاف القطبية. لذلك، فإن الصانع أثناء تحديد متانة الدفع للمحول يأخذ في اعتباره خصائص الدفع العامة للمحول.

١١-٧ اختبار قواطع الدائرة Testing of Circuit Breakers [CBs]

عندما تصمم معدة بمواصفات خاصة ثم تُصنع، تحتاج اختبار لأدائها. ويجرب التصميم العام ونتائج هذه الاختبارات تجرى على قاطع واحد يتم اختياره وهكذا تكون قابلة للتنفيذ على كل التركيبات الأخرى المتماثلة. هذه الاختبارات تسمى "اختبارات الطرز". وتقسم كالآتي:

١. اختبارات دائرة القصر:

(أ) اختبار سعة التوصيل. (ب) اختبار سعة الفصل.

(ج) اختبار تيار الزمن القصير. (د) اختبار واجب التشغيل.

٢. اختبارات العزل الكهربي:

(أ) اختبار تردد القدرة:

- اختبار الصمود الجاف دقيقة واحدة.
- اختبار الصمود المبلل دقيقة واحدة.

(ب) اختبار الصمود الجاف للجهد الدفعي.

٣. الاختبار الحراري.

٤. الاختبار الميكانيكي.

بمجرد الحصول على تصميم خاص سليماً، تصنع كميات كبيرة من قواطع الدائرة CBs المماثلة للتسويق. كل قطعة من C.B تختبر بعد ذلك قبل إدخالها الخدمة. وهذه الاختبارات معروفة باسم "الاختبارات الوتيرية". ومع هذه الاختبارات من الممكن اكتشاف ما إذا كان هناك تجميع خاطئ أو مادة أقل جودة استخدمت في المعدة. وتُقسم هذه الاختبارات كالآتي:

١. اختبارات التشغيل.

٢. اختبارات هبوط الملليفولت.

٣. اختبارات جهد تردد القدرة عند الصانع.

٤. اختبارات جهد تردد القدرة بعد التركيب في الموقع.

وسنناقش أولاً اختبارات الطراز type tests. وفي ذلك سنناقش اختبارات دوائر القصر بعد الاختبارات الثلاثة الأخرى.

اختبارات العزل الكهربي Dielectric Tests

خصائص العزل العامة لأي قاطع دائرة C.B أو مجموعة مفاتيح كهربية switchgear تعتمد على التصميم الأساسي أي الخلوصات، مواد الجلب، ...إلخ. وعلى صحة ودقة التجميع وعلى جودة المواد المستخدمة. ولأي C.B. تختبر هذه العوامل من وجهة نظر قدرتها على مقاومة الجهود الزائدة عند جهد الخدمة العادية والجهود غير العادية أثناء الصواعق أو الظواهر الأخرى.

ويؤثر جهد الاختبار لفترة دقيقة واحدة بين:

١. الأطوار مع غلق القاطع.
٢. الأطوار والأرض مع فتح القاطع.
٣. عبر الأطراف مع فتح القاطع.

مع هذا، يجب أن لا يحدث شرر أو تثقب. وهذه الاختبارات تنفذ عادة على المفاتيح الكهربية الداخلية. وبالنسبة لهذه الـ C.Bs تكون الاختبارات الدفعية عامة غير ضرورية لأنها لا تتعرض لجهود دفعية عالية جداً. تمورات تشغيل المفاتيح عالية التردد قد تحدث ولكن تأثيرها في أنظمة الكابل المستخدمة للمفاتيح الداخلية وجد أنها تقاوم بأمان بواسطة المفاتيح إذا قاومت اختبار التردد العادي.

وحيث إن المفاتيح الكهربية الخارجية تكون معرضة كهربياً، فإنها ستتعرض لجهود زائدة بسبب الصواعق والبرق. تأثير هذه الجهود يكون أكثر خطورة من جهود تردد القدرة في الخدمة. لذلك، تتعرض هذه الفئة من المفاتيح بالإضافة لاختبارات تردد القدرة لاختبارات الجهد الدفعي.

ويجب أن يكون جهد الاختبار موجة قياسية .1/50 μ sec، تُحدد قيمة الذروة لها حسب الجهد المقنن للقاطع. ويحدد جهد دفعي أعلى لنظام مؤرض غير فعال من ذلك المخصص لنظام مؤرض صلب. ويؤثر جهد الاختبار بين:

١. كل قطب والأرض مع القاطع مغلق والأطوار المتبقية مؤرضة.
٢. بين كل الأطراف على جانب واحد من القاطع وكل الأطراف الأخرى مؤرضة، مع فتح القاطع.

الجهود المحددة هي قيم صمود أي أن القاطع يجب أن لا يحدث شرر لعشرة تأثيرات من الموجة. وعادة ينفذ هذا الاختبار مع موجات من كلا القطبيتين.

يستخدم اختبار العزل المبلل للمفاتيح الخارجية outdoor. وفيها، يرش العزل الخارجي لمدة دقيقتين بينما يؤثر جهد الخدمة المقنن، ثم يحفظ الجهد الزائد للاختبار لمدة 30 sec. وأثناء ذلك يجب عدم حدوث شرر. تأثير المطر على العزل الخارجي يكون مفيداً جزئياً، حيث ينظف السطح وأيضاً يكون ضاراً إذا احتوى المطر على شوائب.

الاختبارات الحرارية Thermal Tests

تجرى هذه الاختبارات للتحقق من السلوك الحراري للقاطعات. في هذا الاختبار يمر التيار المقنن خلال كل الثلاثة أطوار من المفتاح باستمرار لفترة طويلة تكفي لحدوث شروط حالة مستقرة. ويتم الحصول على قراءات درجة الحرارة بواسطة مزدوجات حرارية thermocouples والتي توضع الوصلات الساخنة لها في الأماكن المناسبة. ويجب أن يكون ارتفاع درجة الحرارة فوق درجة الحرارة المحيطة –للموصلات– لا تتجاوز 40°C عندما يكون التيار العادي المقنن أقل من 800 A، 50°C إذا كان 800 A وما فوقها.

وهناك مطلب إضافي في اختبار الطراز هو قياس مقاومات التلامسات بين التلامسات المعزولة وبين التلامسات المتحركة والثابتة. هذه النقط هي عامة المصادر الرئيسية لتوليد الحرارة الزائدة. هبوط الجهد عبر قطب القاطع يقاس لقيم مختلفة من التيار d.c الذي هو مقياس لمقاومة الأجزاء الحاملة للتيار وبالتالي للتلامسات.

الاختبارات الميكانيكية Mechanical Tests

يجب أن يفتح ويغلق الـ C.B عند السرعة الصحيحة ويؤدي هذه العمليات بدون أي فشل ميكانيكي. ولذلك، تخضع آلية القاطع لاختبار طرز إطاقة [تحمل] ميكانيكي يشمل فتح وغلق متكرر للقاطع. وتتطلب B.S. 116: 1952 500 من هذه العمليات بدون فشل وبدون ضبط الآلية. ويعتمد بعض المصنعين أنه يمكن الوصول إلى 20000 عملية قبل الحصول على أي معلومات مفيدة تتعلق بالأسباب المكنة للفشل. أي تغيير ناتج في المواد أو الأبعاد لمكون خاص يمكن أن يحسن عمر وكفاءة الآلية mechanism.

اختبارات دائرة القصر Short Circuit Tests

هذه الاختبارات تنفذ في محطات اختبار دوائر القصر لإثبات مقننات C.Bs. قبل مناقشة

الاختبارات من المناسب مناقشة محطات اختبار دوائر القصر.

يوجد نوعان من محطات الاختبار:

١. طرز الميدان field type.　　　　٢. طرز المعمل laboratory type.

في حالة طرز الميدان تكون القدرة المطلوبة للاختبار مأخوذة مباشرة من نظام قدرة كبير. ويوصل القاطع المراد اختباره بالنظام. وبينما طريقة الاختبار هذه تكون اقتصادية لقواطع الجهد العالي إلا أنها تعاني من العيوب الآتية:

١. الاختبارات لا يمكن أن تنفذ تكرارياً للأبحاث والتطور حيث تزعج الشبكة كلها.
٢. تعتمد القدرة المتاحة على موقع محطات الاختبار، شروط التحميل، السعة المركبة، ...إلخ.
٣. شروط الاختبار مثل جهد الاستعادة المطلوب، لا تتحقق بشكل مناسب.

في حالة اختبار المعمل يتم التزود بالقدرة المطلوبة للاختبار بواسطة مولدات مصممة خصيصاً. وتتميز هذه الطريقة بالآتي:

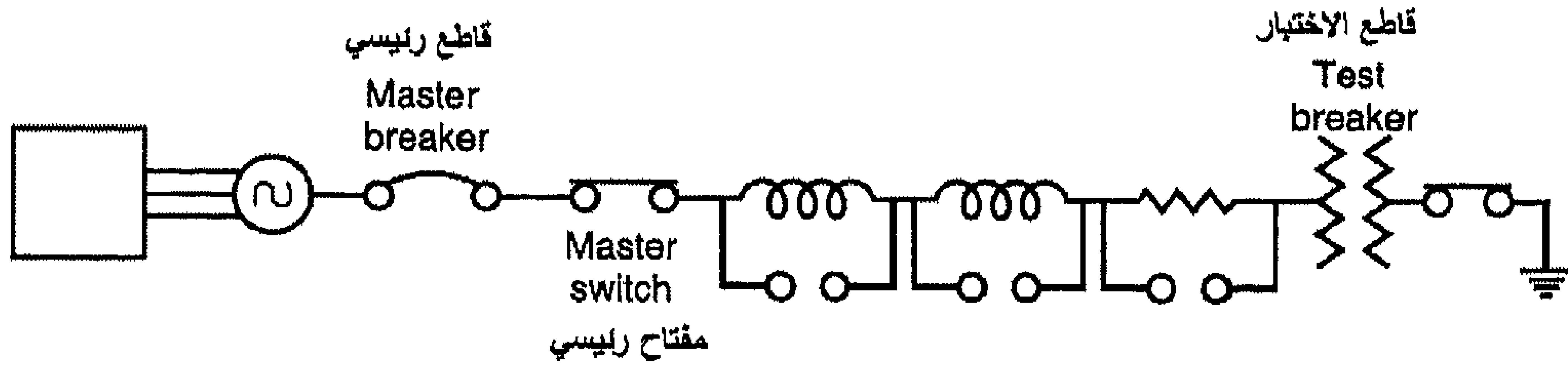
١. شروط الاختبار مثل التيار، الفولتن معامل القدرة، يمكن التحكم فيها بدقة.
٢. يمكن استخدام طرق اختبار غير مباشرة عديدة.
٣. يمكن تكرار الاختبار وبالتالي تكون الأبحاث والتطوير ممكناً.

قيود هذه الطريقة هي التكلفة والقدرة المحدودة المتاحة لاختبار الـ C.Bs.

وحدات اختبار دائرة القِصَر Short Circuit Test Plants

المكونات الأساسية لوحدة اختبار نموذجية ممثلة في الشكل 11.4. ويتم إمداد قدرة دائرة القِصَر بواسطة مولدات دائرة قِصَر مصممة خصيصاً وتدار بواسطة محركات حثية. ويمكن أن يتغير مقدار الفولت بضبط إثارة المولد أو نسبة المحول. ومتاح قاطع دائرة رئيسي ليقطع تيار دائرة قصر الاختبار إذا سقط قاطع الاختبار. ويمكن أن يكون بدء دائرة القصر بواسطة القاطع الرئيسي، ولكنه ينفذ دائماً بواسطة مفتاح توصيل مصمم خصيصاً للغلق عند التيارات الثقيلة جداً ولكنه لا يستدعي أبداً لقطع التيارات. ويمكن أن ترتب لفائف المولد إما لتوصيلات نجمة أو دلتا حسب الفولت المطلوب، بواسطة مزيد من تقسيم اللفائف إلى قطاعين يمكن أن يوصلا على التوالي أو التوازي، ومتاح اختيار أربعة فولتات. بالإضافة إلى ذلك فإن استخدام مقاومات

ومفاعلات على التوالي يعطي مدى واسع من التيار ومعاملات القدرة. المولد، المحول، والمفاعلات موجودة معاً في مبنى مؤهل لخلايا الاختبار.



الشكل 11.4: مخطط وحدة اختبار نموذجية

المولد Generator

يختلف مولد دائرة القصر في التصميم عن محطة القدرة التقليدية. سعة هذه المولدات يمكن أن تكون في حدود 2000 MVA وتكون التكتيفات [التقوية] الجاسئة للموصلات وأطراف الملف ضرورية بسبب القوى الكهرومغنطيسية العالية الممكنة. العامل المحدد لأقصى تيار خرج هو القوة الكهرومغنطيسية. وحيث إن تشغيل المولد يكون متقطعاً، فإن هذا لا يحتاج لأن يكون كفء جداً. تخفيض التهوية يمكن الفيض الرئيسي من أن يكون متزايداً ويسمح باحتواء المزيد من أطراف الملفات الزائدة. وتنخفض مفاعلة الآلة إلى الحد الأدنى.

وفي الحال قبل الغلق الفعلي لمفتاح التوصيل فإن محرك إدارة المولد يشغل وتؤخذ طاقة دائرة القصر من طاقة حركة مجموعة المولد. ويتم ذلك لتجنب أي اضطراب للنظام أثناء دائرة القصر. ومع ذلك، في هذه الحالة من الضروري تعويض الانخفاض في جهد المولد المقابل لتخفيض سرعة المولد أثناء الاختبار. ويتم ذلك بضبط إثارة مجال المولد لزيادتها عند معدل مناسب أثناء فترة دائرة القصر.

المقاومات والمفاعلات Resistors & Reactors

تستخدم المقاومات للتحكم في معامل قدرة التيار وللتحكم في معدل تضاؤل مركبة التيار d.c. يوجد عدد من الملفات لكل طور وبالتوليف بتوصيلات توالي وتوازي، يمكن الحصول على القيمة المطلوبة من المقاومة و/أو المفاعلة.

المكثفات Capacitors

وهي تستخدم لقطع تيارات شحن الخط وللتحكم في معدل فلطية إعادة الإشعال.

محولات دائرة القصر Short Circuit Transformers

تكون مفاعلة تسرب المحول منخفضة لكي تقاوم دوائر القصر المتكررة. وحيث إنها تستخدم متقطعة، فإنها لا تشكل أي مشكلة تبريد. بالنسبة للفولت الأعلى من الفولتات المولدة، تستخدم عادة مجموعات من المحولات وحيدة الطور. في محطة دائرة قصر Bhopal توجد ثلاث وحدات وحيدة الطور كل منها 11 kV/76 kV . المقنن العادي هو 30 MVA ولكن سعة دائرة القصر لهم هي 475 kVA .

قواطع الدائرة الرئيسية Master C.Bs

تزود هذه القواطع كمساندة حيث تشغل عندما يفشل تشغيل القاطع تحت الاختبار. هذه القواطع تكون عادة من القواطع التي تعمل بدفع الهواء air blast type وتكون سعتها أكبر من سعة القواطع تحت الاختبار. بعد كل اختبار، تعزل قاطع الاختبار عن المصدر وتستطيع التعامل مع دائرة القصر الكاملة.

مفتاح التوصيل Make Switch

يغلق مفتاح التوصيل بعد غلق المفاتيح الأخرى. ويكون غلق المفتاح سريعاً، أكيد وبدون اصطكاك. ولكي نتجنب الارتداد وبالتالي لحام التلامسات، يحفظ ضغط هوائي عالي في الغرفة. سرعة الغلق تكون عالية لذلك تغلق التلامسات كاملة قبل وصول تيار دائرة القصر إلى قيمته الذروية.

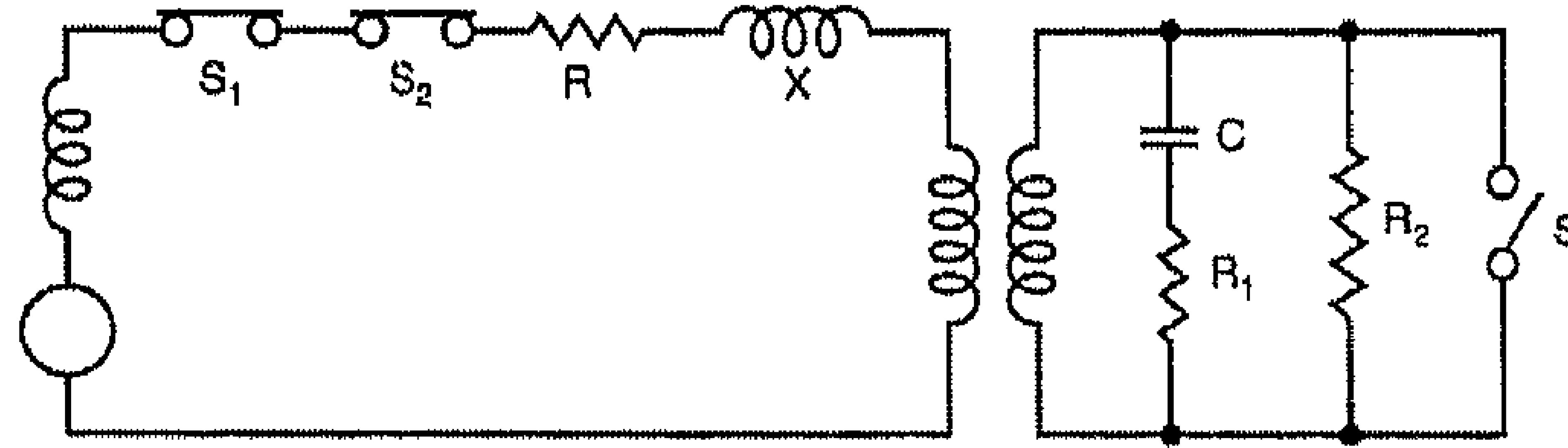
خطوات الاختبار Test Procedure

قبل أداء الاختبار تضبط كل المكونات لقيم مناسبة للحصول على القيم المرغوبة من الفولت، التيار، معدل ارتفاع فولت إعادة الإشعال، معامل القدرة، ...إلخ. توصل دوائر القياس وتعاير إطارات الأوسليجراف.

أثناء الاختبار تؤدى عدة عمليات متوالية في زمن قصير في حدود 0.2 sec. وينفذ ذلك بمساعدة مفتاح اسطواني مع عدد من التلامسات المزدوجة التي تدور مع محرك. عندما تدور هذه الاسطوانة تغلق وتفتح عدد من دوائر التحكم طبقاً لترتيب معين. في أحد اختبارات سعة القطع لوحظت المتتابعة التالية:

١. بعد تدوير المحرك إلى سرعة تم قطع الإمداد [فتح الدائرة].
٢. وصت الإثارة الدفعية.

٣. القاطع الرئيسي تم غلقه.
٤. الأوسليجراف تم تشغيله.
٥. غلق مفتاح التوصيل.
٦. C.B تحت الاختبار تم فتحه.
٧. C.B الرئيسي تم فتحه.
٨. دائرة المستثير فتحت.



الشكل 11.5: دائرة اختبار مباشر

ويبين الشكل 11.5 دائرة اختبار مباشر.

هنا $X_G =$ مفاعلة المولد.

S_1 ، $S_2 =$ المفاتيح الرئيسية والتوصيل على التوالي.

R ، $X =$ المقاومة والمفاعلة لتحديد التيار والتحكم في معامل القدرة.

$T =$ المحول.

C ، R_1 ، $R_2 =$ دائرة ضبط فولت إعادة الإشعال.

لاختبار سعة قطع القاطع تحت الاختبار، يغلق أولاً الرئيسي والقاطع تحت الاختبار. وتؤثر دائرة القصر بغلق مفتاح التوصيل. يفتح القاطع تحت الاختبار عند اللحظة المرغوبة ويحدد تيار القطع من الأوسليجراف كما سبق.

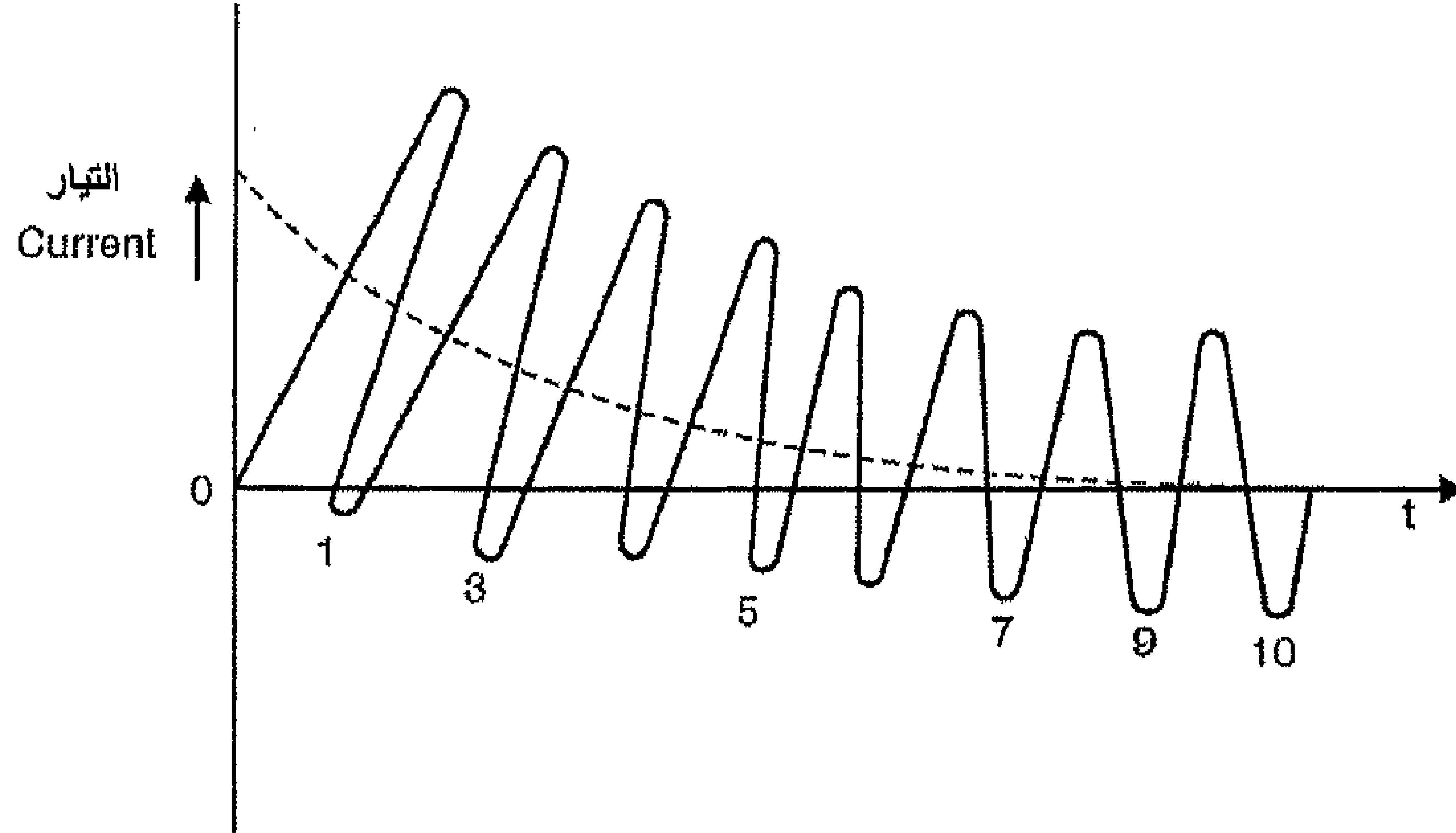
ولاختبار سعة التوصيل يغلق أولاً المفتاح الرئيسي ومفتاح التوصيل وتؤثر دائرة القصر بغلق القاطع تحت الاختبار. ويحدد تيار التوصيل من الأوسليجراف كما سبق.

ولاختبار تيار الزمن–القصير، يمر التيار خلال القاطع لزمن قصير وليكن 1 sec. ويؤخذ الأوسليجراف كما هو موضح في الشكل 11.6.

من الأوسليجرام نحصل على قيمة الـ r.m.s المكافئة لتيار الزمن–القصير كالتالي:

تقسم الفترة الزمنية من 0 إلى T إلى عشرة أجزاء متساوية ترقم كالآتي: 0، 1، 2، ...، 9، 10. نفترض أن قيمة r.m.s للتيارات عند هذه اللحظات هي I_0 ، I_1 ، I_2 ، ...، I_9 ، I_{10} [قيم غير متماثلة]. من هذه القيم، تحسب قيمة r.m.s لتيار الزمن القصير باستخدام صيغة سمبسون Simpson وهي:

$$I = \sqrt{\frac{1}{3}\left[k_0^2 + 4\left(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \ldots + I_9^2\right) + 2\left(I_2^2 + I_4^2 + \ldots + I_{10}^2\right)\right]}$$



الشكل 11.6: إيجاد تيار الزمن–القصير

وتؤدى اختبارات واجب التشغيل حسب المواصفات القياسية إذا لم يكن الواجب مكتوباً على لوحة مقنن القاطع. الاختبارات حسب المواصفات هي:

١. B–3′–B–3′–B عند 10% من سعة القطع المتماثلة المقننة.

٢. B–3′–B–3′–B عند 30% من سعة القطع المتماثلة المقننة.

٣. B–3′–B–3′–B عند 60% من سعة القطع المتماثلة المقننة.

٤. B–3′–MB–3′–MB عند أكبر من 100% من سعة القطع المتماثلة المقننة. عند أكبر من 100% من سعة التوصيل المقننة. اختبار الواجب (٤) يمكن أن يؤدي كواجبين منفصلين كالآتي:

(أ) M–3′–M [اختبار توصيل].

(ب) B–3′–B–3′–B [اختبار قطع].

٥. B–3′–B–3′–B عند أكبر من 100% من سعة القطع غير المتماثلة.

وهنا تمثل B، M عمليات القطع breaking والتوصيل making على الترتيب. وتشير MB إلى عملية التوصيل المتبوعة بعملية القطع بدون أي زمن تأخير متعمد. وتشير ′3 إلى الزمن بالدقيقة بين العمليات المتعاقبة لواجب تشغيل.

١١-٨ جهود الاختبار Test Voltages

لجهود النقل المختلفة، تعطي الجداول التالية جهود الاختبار المطلوبة.

الجدول 11.2: جهود الاختبار لمعدات a.c

الجهد الاسمى (r.m.s)	جهد مقاومة تردد القدرة (r.m.s)	جهد مقاومة النبض (kV)	جهد مقاومة تمور تشغيل المفاتيح
400	520	1425	875
525	670	1800	1100
765	960	2300	1350
1100	1416	2800	1800
1500	1920	3500	2200

الجدول 11.3: جهود الاختبار لمعدات d.c

الجهد الاسمى (kV)	جهد مقاومة d.c (kV)	جهد مقاومة النبض (kV)	جهد مقاومة تمور تشغيل المفاتيح (kV)
± 400	800	1350	1000
± 600	1200	1900	1500
± 800	1600	2300	2000

الجدول 11.4: جهود الاختبار المطلوبة لجهود نظام a.c المختلفة

الجهد الاسمى ($kV_{r.m.s}$)	جهد تردد القدرة ($kV_{r.m.s}$)	جهد مقاومة النبض (kV)	جهد تمور تشغيل المفاتيح (kV)
400	800	2400	1150
765	1000	3000	1750
1100	1400	3700	2300
1500	1900	4600	2800

إذا كانت مطالب العزل لجهد تشغيل خاص مطلوب دراستها في معمل بحوث، فإن مستويات الجهد المطلوبة في المعمل معطاة في الجدولين 11.4، 11.5.

الجدول 11.5: جهود الاختبار المطلوبة لجهود نظام d.c المختلفة

الجهد الاسمى (kV)	جهد d.c (kV)	جهد مقاومة النبض (kV)	جهد تمور تشغيل المفاتيح (kV)
± 400	800	1750	1300
± 600	1200	2500	2000
± 800	1600	3000	2600

الجدول 11.6: الأبعاد التقريبية لمعدة الاختبار والمعدة المختبرة

الجهد الاسمى للمعدة ($kV_{r.m.s}$)	ارتفاع المحول a.c (m)	ارتفاع المولد النبضي (m)	أبعاد المعدة المختبرة
400	10	6	$7 \times 2 \times 11$
765	15	8	$11 \times 2 \times 17$
1100	18	12	$17 \times 2 \times 24$
1500	22	15	$28 \times 2 \times 38$

الجدول 11.7: معامل الجهد العالي في العالم

المكان	الأبعاد	جهد اختبار تردد القدرة (MV)	جهد الاختبار النبضي (MV)	جهد تمور المفاتيح (MV)
استراليا		1.5	8.0	–
Bharat Heavey Elect. Bhopal, India	$67 \times 35 \times 35$	1.5	3.6	2.0
CESI-Milan Italy	$150 \times 75 \times 55$	2.3	4.8 (200 kJ)	3.0
College of Engineering, Guindy, Madras	$25 \times 15 \times 15$	0.3	1.2	–
College of Engineering, Jabalpur (MP)	$33 \times 26 \times 30$	0.5	1.4 (16 kJ)	–
College of Engineering, Kakinada, AP	$20 \times 12 \times 8$	0.5	1.4 (16 kJ)	–
Electricity DC, France	$65 \times 65 \times 45$	2.5	7.2 (1010 kJ)	6.0

المكان	الأبعاد	جهد اختبار تردد القدرة (MV)	جهد الاختبار النبضي (MV)	جهد تمور المفاتيح (MV)
Hydro-Quebec Montreal, Canada	82 × 68 × 50	2.5	6.4 (400 kJ)	6.0
Indian Instt. of Science, Bangalore	37.5 × 25 × 19	1.05	3.0 (50 kJ)	1.6
Indian Instt. of Technology, Madras	28 × 10 × 9.7	0.80	1.5 (36 kJ)	–
Russia	115 × 80 × 60	3.0	8.0	–
Technical University Darmstadt W. Germany	32 × 25 × 21	1.2	3.2	–
Technical University Munich W. Germany	34 × 23 × 19	1.2	3.0	–

أسئلة

١١–١ اشرح خطوات اختبار عازل تعليق.

١١–٢ صف ترتيب العوازل لإجراء الاختبارات المختلفة.

١١–٣ اذكر الاختبارات المختلفة التي تنفذ على عازل. مع فكرة مختصرة عن كل اختبار.

١١–٤ اكتب مذكرة مختصرة عن تجهيز عينة الكابل قبل خضوعه للاختبارات المختلفة.

١١–٥ اذكر الاختبارات المختلفة التي تجرى على كابل.

١١–٦ اشرح باختصار الاختبارات المختلفة التي تجرى على جلبة.

١١–٧ اشرح وظيفة جهاز التفريغ المستخدم في مكثف قدرة.

١١–٨ اشرح خطوات أداء:

(أ) اختبار IR.

(ب) اختبار الاستقرار.

(ج) اختبار التفريغ الجزئي.

١١–٩ اشرح باختصار الاختبار الدفعي [النبضي] لمحول قدرة.

١١–١٠ صف الاختبارات المختلفة التي تنفذ على قاطع الدائرة C.B.

١٢

الجهود الزائدة الجوية والوقاية منها

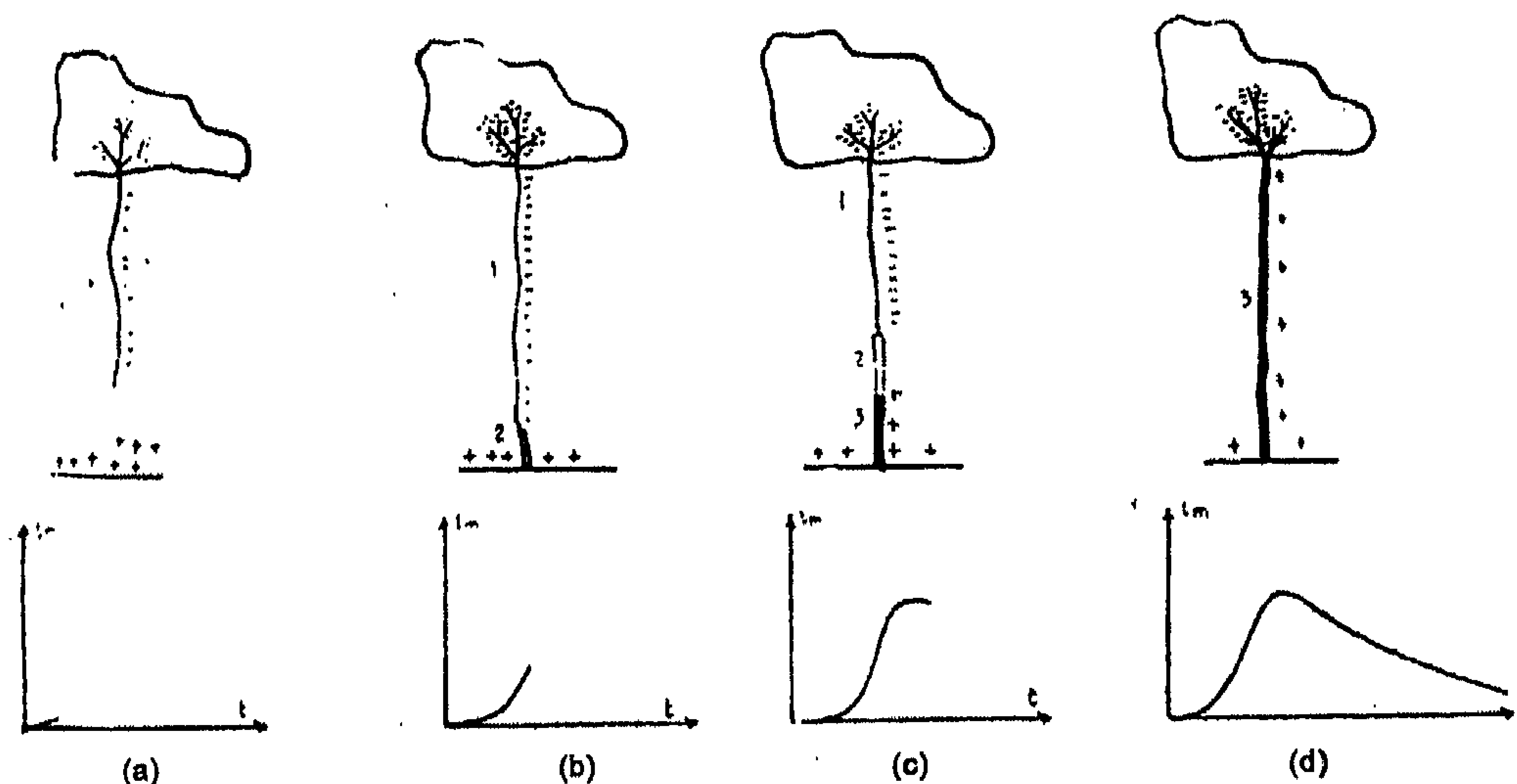
Atmospheric Overvoltages & Protection from It

١٢-١ معلومات عامة General Information

الصاعقة lightning هي حالة خاصة من تفريغ الشرارة تكون المسافة فيها بين الإلكترودات كبيرة جداً. وقد أظهرت الأبحاث الحديثة أن الطول الكلي لقناة الصاعقة تصل إلى كيلومترات قليلة [متوسط 5 km]، ويقع جزء محسوس من هذه القناة داخل السحب –ولذلك– لا يمكن تسجيلها بواسطة كاميرا ضوئية. وبسبب توزيع الشحنة الخاص بنوعها في السحب، تتكون الصواعق من تفريغات منفصلة قليلة، تنمو بطول مسار واحد، كل من التفريغات –بالضبط مثل شرارة المعمل– تبدأ من التفريغ المتقدم leader ويبلغ ذروته في التفريغ الراجع [الرئيسي]. سرعة رحيل المتقدم للتفريغ المنفصل الأول تكون في حدود 1.5×10^{7} cm/sec. سرعة المتقدم للتفريغات التالية تصل إلى قيمة 2×10^{8} cm/sec.، وسرعة التفريغ العكسي تتراوح بين $\left(1.5\times10^{9}-1.5\times10^{10}\right)$cm/sec.، أي من (0.05–0.5) من سرعة الضوء.

القناة المتقدمة –مثل أي قناة لأي تدفق– تكون مملوءة بالبلازما، وبالتالي، يكون لها موصلية محددة. وتتصل القناة المتقدمة مع طرفها العلوي بأحد مراكز الشحنة في السحابة، ومن هنا فإن جزء من شحنات هذا المركز تتسرب إلى القناة المتقدمة. توزيع هذه الشحنة في القناة يجب أن يكون غير منتظم، ومتزايد في اتجاه طرفه. ومع ذلك، تسمح بعض القياسات غير المباشرة باستنتاج أن أدنى كثافة للشحنات في القناة تكون قريبة من الكثافة المتوسطة، وبهذه الطريقة، فإن تخزين الشحنة عند نهاية القناة يلعب دوراً ثانوياً. من هنا، وفي عدد من الحسابات، يكون من الممكن اعتبار كثافة الشحنة الخطية [الشكل 12.1] منتظمة في التقريب

الأول واعتبار أن الشحنة الإجمالية الممنوحة إلى القناة المتقدمة هي $Q=\sigma l$، حيث l طول قناة الصاعقة، σ كثافة الشحنة الخطية.



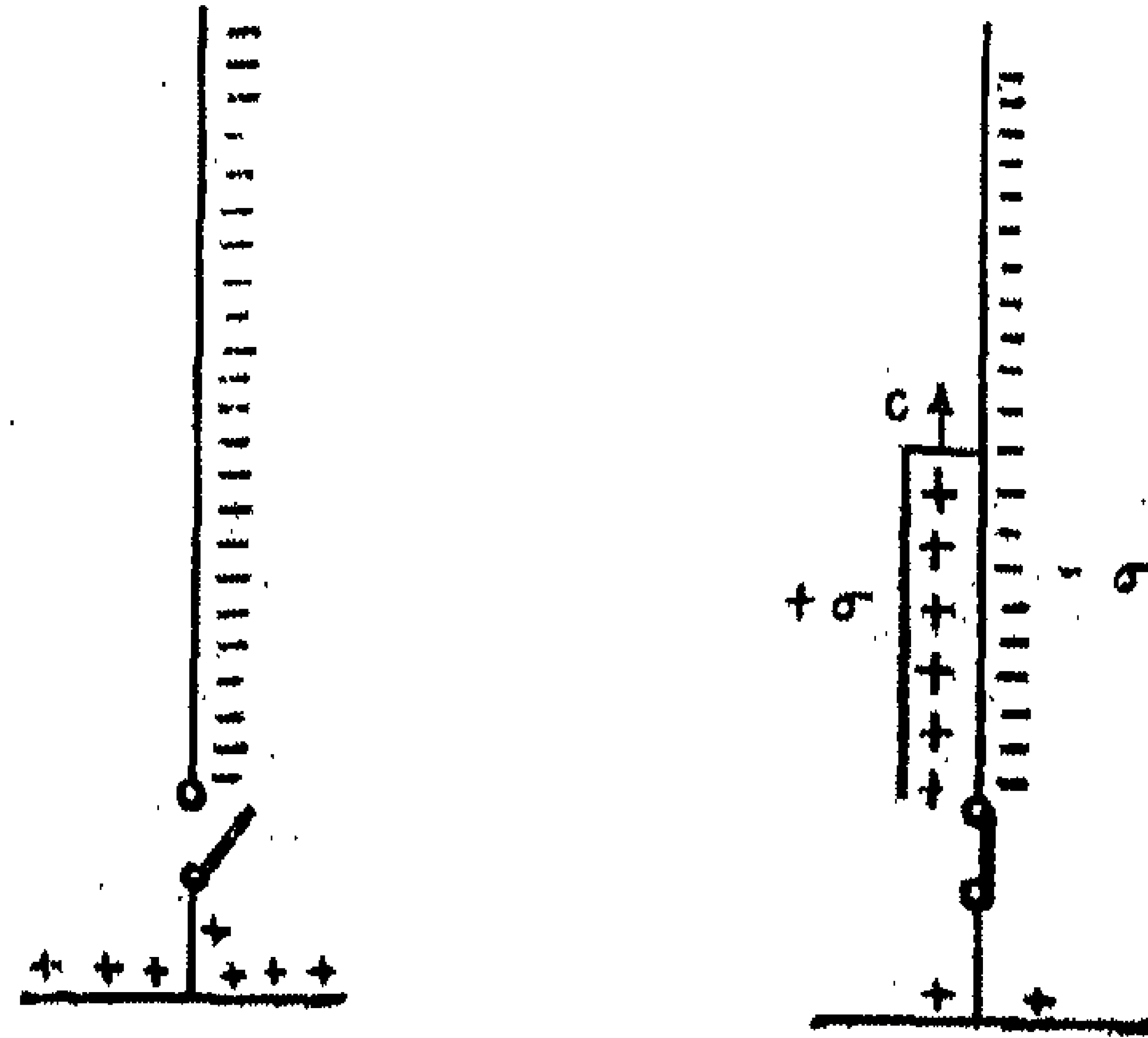
الشكل 12.1: المراحل المختلفة لنمو التفريغ الراجع وتغير تيار الصاعقة مع الزمن. (a) المرحلة الأخيرة لنمو التفريغ المتقدم؛ (b) حدوث منطقة التأين الشديد قريباً من سطح الأرض؛ (c) المرحلة المتوسطة لنمو التفريغ العائد؛ (d) المرحلة النهائية لنمو التفريغ الراجع. (1) القناة المتقدمة؛ (2) منطقة إعادة التركيب للقناة؛ (3) قناة التفريغ الراجع [المرتد]

بالتناسب مع حركة القناة المتقدمة تحت فعل المجال الكهربي للقناة، يحدث إعادة توزيع للشحنات على الأرض، ونتيجة لذلك تخزن شحنات موجبة على سطح الأرض تحت القناة المتقدمة النامية مباشرة. وتبع لذلك يحدث أن تكون شدة المجال أعلى بطول خط قوة المجال الكهربي الذي يوصل رأس المتقدمة مع مكان أقصى تركيز للشحنات على سطح الأرض، وتنمو المتقدمة بطول خط القوة هذا ويحدث أن يكون مكان الضربة في الأرض يكون مسبق التحديد.

تخزن الشحنات في الأرض تحت رأس المتقدمة مباشرة فقط في حالة الموصلية المنتظمة للتربة. وإذا نما التفريغ المتقدم -مثلاً- فوق تربة صخرية، موصليتها منخفضة جداً وكان قطاع من الأرض ذات موصلية جيدة [مثلاً نهر أو بحيرة] موجود قريباً، فإن الشحنات تتسرب بعيداً إلى القطاع الذي يملك موصلية أعلى، وتحدث شدات مجال عالية هناك وينحني مسار التفريغ، متوجهاً إلى هذه القطاعات. ويتم شرح ما يسمى بـ"قابلية الضرب المنتقاة" بواسطة تفريغات

الصواعق. بهذه الحقيقة، عندما تضرب الصواعق قطاعات الأرض ذات المستويات العالية من المياه الجوفية تحت التربة التي تتدفق في طبقات النهر العميقة وهكذا. أثناء دراسة وسائل الحماية من الصواعق –في عدد من الحالات– يصبح من الضروري أن نأخذ في الاعتبار هذه الظروف.

في تناسب مع حركة القناة المتقدمة leader canal، فإن متوسط شدة المجال في الفراغ بين رأسها والأرض يزداد تدريجياً. وفي النهاية يتعدى القيمة الحرجة ويبدأ تأين شديد يؤدي إلى تكون قناة مملوءة بالبلازما تكون كثافة الأيونات فيها أكبر من تلك التي في القناة المتقدمة. وكعاقبة لموصليتها العالية، تصل القناة المتكونة إلى جهد الأرض، ويؤثر فرق الجهد الكامل بين القناة المتقدمة والأرض على الجزء السفلي للقناة المتقدمة. وبهذه الطريقة، تتكون منطقة ذات شدات مجال قوية جداً عند الحدود بين القناة المتقدمة والقناة المعاد تكونها. تحت فعل هذه الشدة يحدث إعادة تركيب الجزء السفلي من القناة المتقدمة، ويصل أيضاً إلى جهد الأرض وتنقل منطقة الشدات العالية إلى أعلى عبر القناة. وهذه العملية تسمى "الضربة المرتدة" return stroke، وسرعتها –بالتالي– تعتمد على الزمن الذي استغرقته في إعادة تكوين القناة تحت فعل التأين في منطقة شدة المجال العالية. وإذا أمكن تحقيق إعادة تكوين القناة لحظياً، فإن سرعة الضربة المرتدة [التفريغ] يمكن أن تزداد حتى سرعة الضوء.



الشكل 12.2: التوصيل للأرض لوصل رأس مشحون

بالتناسب مع حركة الضربة المرتدة إلى أعلى، تصل قناة الصاعقة إلى جهد صفر وتسري الشحنات الزائدة في القناة المتقدمة إلى الأرض، معطية ارتفاع لتيار محدد i_m في مكان الضربة.

إذا كانت كثافة الشحنة الخطية في القناة المتقدمة تساوي σ وسرعة حركة الضربة المرتدة هي v، فإن شحنة مقدارها σv تتدفق إلى الأرض في وحدة الزمن ولذلك:

$$i_m = \sigma v \tag{1.12}$$

العملية التي تحدث أثناء التغير من التفريغ المتقدم إلى التفريغ المرتد، تكون مشابهة لعملية دائرة القصر إلى الأرض لموصل رأسي مشحون [الشكل 12.2]. أثناء ذلك -كما هو معروف جيداً- سترحل موجة تفريغ الشحنات الموجبة إلى أعلى عبر الموصل مع سرعة الضوء، منخفضة الفولت إلى صفر في العملية. ويحدد التيار في مكان دائرة القصر بواسطة المعادلة (12.1) إذا قُصر الموصل بالأرض خلال مقاومة معنية r، فإن قيمة التيار في مكان دائرة القصر سينخفض وسيساوي:

$$i = \sigma v \frac{Z}{Z + r}$$

حيث Z = معاوقة التمور للموصل.

وباستغلال هذا التشابه من الممكن افتراض أن تيار الصاعقة سيعتمد أيضاً على المقاومة في مكان الضربة stroke، أي على المقاومة النوعية للتربة في حالة ضربه للأرض أو على مقاومة تأريض في خالة ضرب لكل الأهداف.

من الصعب جداً تقدير هذا الخفض في التيار، حيث إن التشابه السابق يكون شرطي والقيمة الصحيحة لمعاوقة التمور المكافئة لقناة الصاعقة ليست معروفة. مع ذلك، تقدر حدود هذه المعاوقة لتقع بين Ω (300–200). فيما يلي سنذكر أهدافاً مقاومتها الأرضية لا تتعدى 30 Ω، مؤرضة جيداً وسنعتبر أنه أثناء ضربة الصاعقة إلى هذه الأهداف لا يعتمد التيار في هذه الأهداف على قيمة مقاومة التأريض ويساوي تيار الصاعقة.

١٢-٢ بارمترات تفريغ الصاعقة Parameters of the Lightning Discharge

الخاصية الكمية الأساسية لتفريغ صاعقة هي سعة تيار الصاعقة -لذلك- في الوقت الحاضر، توجد الكمية الأكبر من البيانات التجريبية المتعلقة بهذا البارامتر.

جهاز القياس الأكثر استخداماً لقياس تيارات الصواعق هو "الوصلة المغنطيسية" magnetic link وهو عبارة عن عمود اسطواني مصنوع من حشوات من الفولاذ أو الموصلات المضغوطة في بلاستيك. المواد -التي تحصل منها على الحشو- يجب أن تملك قوة قهرية

coercive force كبيرة، لذلك عندما توضع في مكان في مجال مغنطيسي وبعد اختفاء المجال المغنطيسي، تحتفظ الوصلة المغنطيسية بمغنطيسية متخلفة محسوسة تتناسب مع شدة المجال المغنطيسي عند مكان وضع الوصلة المغنطيسية.

عادة، ترتب الوصلات المغنطيسية على دعامات خط النقل، والتي في كثير من الحالات تنتمي إلى أهداف جيدة التأريض، وتوضع عمودية على محور الدعامة، أي بطول خطوط قوة المجال المغنطيسي. وحيث إن خطوط النقل غالباً ما تضرب بضربات صواعق مباشرة [في المناطق ذات الشدة المتوسطة لنشاط الصواعق، (15–20) مرة في السنة كل 100 km من الخط]، ويسمح مكان الوصلات المغنطيسية على الدعامات بالحصول على كمية كبيرة وكافية من تسجيلات تيار الصواعق كل سنة.

شدة المجال المغنطيسي عند مسافة R من محور الدعامة، لدعامة من طراز معطى، هي دالة مفردة القيمة من التيار المار بطول الدعامة. وفي حالة خاصة، إذا كانت الدعامة اسطوانة معدنية، فإن الشدة H عند مسافة R من محور الدعامة سيكون:

$$H = \frac{i_m}{2\pi R} \qquad (2.12)$$

وبإيجاد اعتماد المغنطيسية المتخلف على شدة المجال المغنطيسي وبقياس المغنطيسية المتخلفة للوصلات المركبة على الدعائم، لن يكون صعباً تحديد تيار الصاعقة المار خلال الدعامة. القياسات بالوصلات المغنطيسية لا تضمن دقة كبيرة وتعطي خطأ في حدود %(15–20) –ومع ذلك– يعوض هذا الخطأ جزئياً بكمية كبيرة جداً من القياسات عددها عشرات الآلاف في الوقت الراهن، وأظهرت القياسات أن سعات تيار الصاعقة يتغير داخل حدود واسعة، من عدد قليل من kA إلى مئات من kA، ومن هنا فإن نتائج القياسات تمثل على هيئة ما يسمى بـ"منحنيات احتمال تيارات الصاعقة" [الشكل 12.3]، وفيها يوقع احتمال حدوث تيارات الصاعقة على محور السينات وعلى محور الصادات سعة التيارات.

الاحتمالات المتحصل عليها من باحثين مختلفين في دول مختلفة معطى في الشكل 12.3. في الاتحاد السوفيتي يستخدم منحنى متوسط معين موصى بقياسات الحماية من الجهود الزائدة [منحنى 3 الشكل 12.3]. وهو دقيق بدرجة مقبولة وممثل بالصيغة التجريبية التالية:

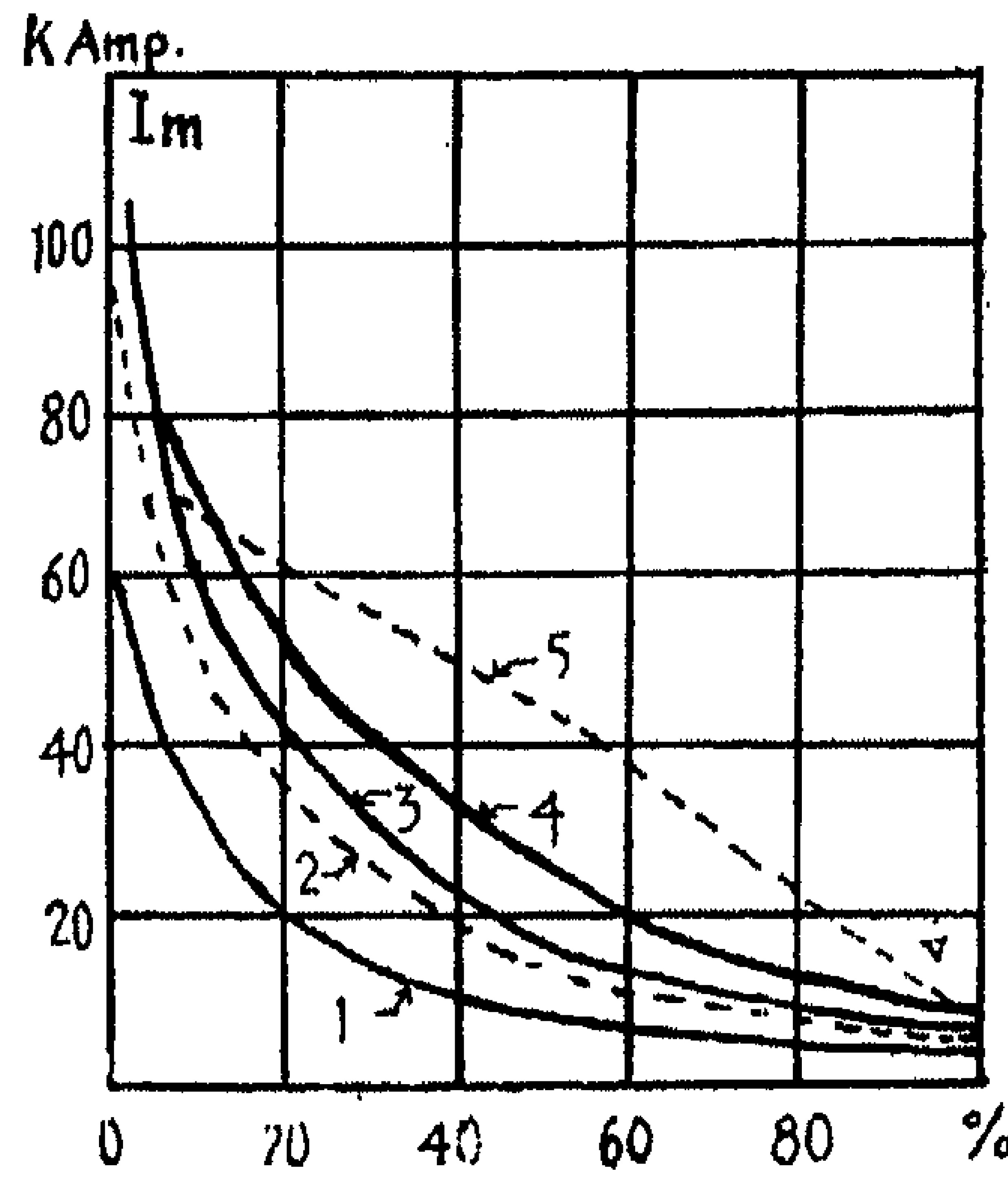
$$\nu_1 = 10^{-\frac{I_m}{60}} = e^{-\frac{I_m}{26.1}}$$

أو

$$\log \nu_1 = -\frac{I_m}{60} \tag{3.12}$$

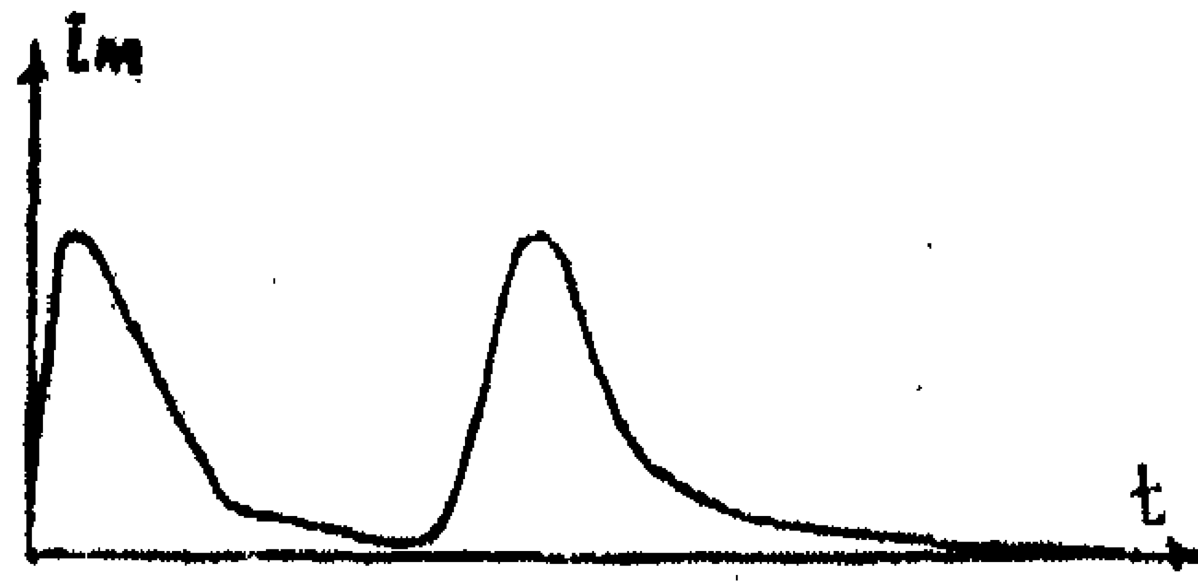
حيث I_m= سعة تيار الصاعقة (kA).

ν_1= احتمال أن سعة تيار الصاعقة سيكون أكبر من أو يساوي I_m.



الشكل 12.3: منحنيات توضح احتمال حدوث سعات من تيار الصاعقة حسب بيانات من مصادر مختلفة.
(1) التفريغات من مبنى الأمبيرستات USA؛ (2) حسب توصيات المعهد الأمريكي لمهندسي الكهرباء؛
(3) في الاتحاد السوفيتي؛ (4) حسب بيانات لويس وفوست؛ (5) حسب قياسات الخطوط الأمريكية

التحديد التجريبي لقانون تغير تيار الصواعق مع الزمن، والذي لا يمكن أن ينفذ بمساعدة أبسط جهاز قياس من طراز الوصلات المغنطيسية، يمثل صعوبات كبيرة. الأبحاث الأوسليجرافية للصواعق –كقاعدة– نفذت على أهداف عالية، وفيها حدثت تفريغات صواعق كافية غالباً. فمثلاً، تم تركيب معمل أبحاث صواعق على مبنى الأمبيرستات في نيويورك عند ارتفاع حوالي 400 m، وتم تزويده بعدد كبير من أوسليجرامات تيارات الصواعق. وأظهرت البيانات أن تيار الصواعق يتغير مع الزمن حسب الشكل الموضح في الشكل 12.4. اندفاع التيارات ذات السعة الكبيرة تقابل الضربات المرتدة [التفريغات] لنبضات مكونات منفصلة لصواعق متعددة. وتنتج التيارات المتدة ذات السعة الأصغر بواسطة تدفق الشحنة إلى الأرض من ذلك المركز في السحابة التي نشأ منها النبضات.



الشكل 12.4 : أوسليجرام مبسط لتيار صاعقة يتكون من تفريغين منفصلين

من وجهة نظر الجهود الزائدة، فإن منطقة التيارات الكبيرة تقابل التفريغ المرتد ذات شكل دفع أسي وله أهمية كبيرة. من الممكن تعريف هذا الدفع [النبض] بمساعدة بارامترين: طول المقدمة وطول الموجة. ويمكن قياس هذه البارامترات بمساعدة أجهزة قياس بسيطة هي الوصلات المغنطيسية والكلايدنوجراف الموصلة حسب أنظمة خاصة. استخدام هذه الأجهزة يسمح بجمع كمية معقولة من البيانات التجريبية والتي هي أقل من كمية البيانات المرتبطة بسعات تيارات الصواعق.

على أساس هذه البيانات يمكن أن نستنتج أن الطول الموجي لتيار الصواعق –في المتوسط– قريب من 40 μ sec. . لذلك فإن الأطوال الموجية الفعلية يمكن أن تختلف عن الطول الموجي المتوسط، وتستخدم هذه القيمة في معظم الحسابات والتجارب.

أثناء تحليل لأنظمة الوقاية من الصواعق، يكون من الملائم تمييز جبهة تيار الصاعقة بمساعدة الانحدار المتوسط –أي– بواسطة المعدل المتوسط لتغير التيار مع الزمن. إذا كانت سعة التيار تساوي I_m وطول الجبهة تساوي τ_f فإن الانحدار المتوسط هو:

$$\alpha = \frac{I_m}{\tau_f}$$

وعلى أساس البيانات التجريبية المتاحة للانحدار α ، بالمثل يكون من الممكن إنشاء محنى احتمال، مشابه لمنحنى الشكل 12.3 والذي بسبب الكمية الصغيرة من البيانات يكون غير موثوق به مثل منحنى احتمال سعات تيارات الصاعقة. منحنى الاحتمالات للانحدار معطى في الشكل 12.5 ويمكن التعبير عنه استقرابياً بواسطة الصيغة التجريبية التالية:

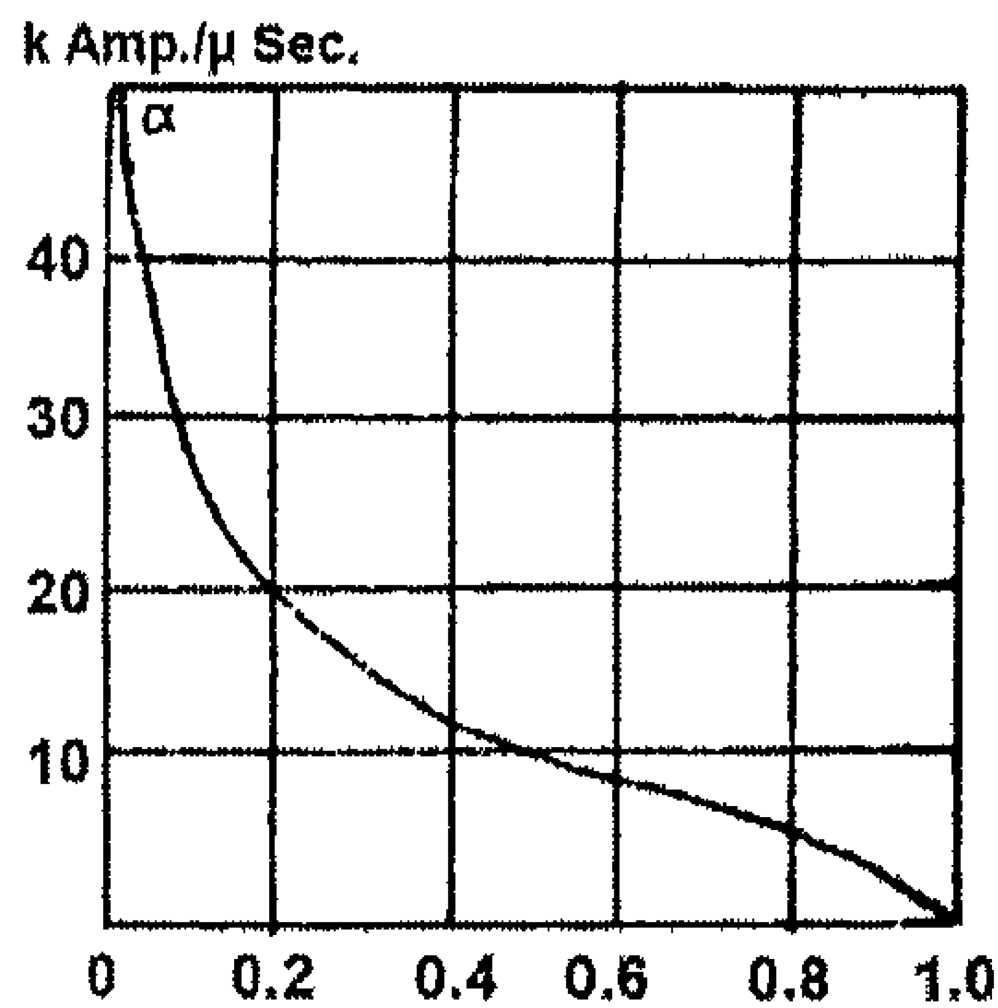
$$\nu_a = 10^{-\frac{\alpha}{25}} = e^{-\frac{\alpha}{10.9}}$$

أو

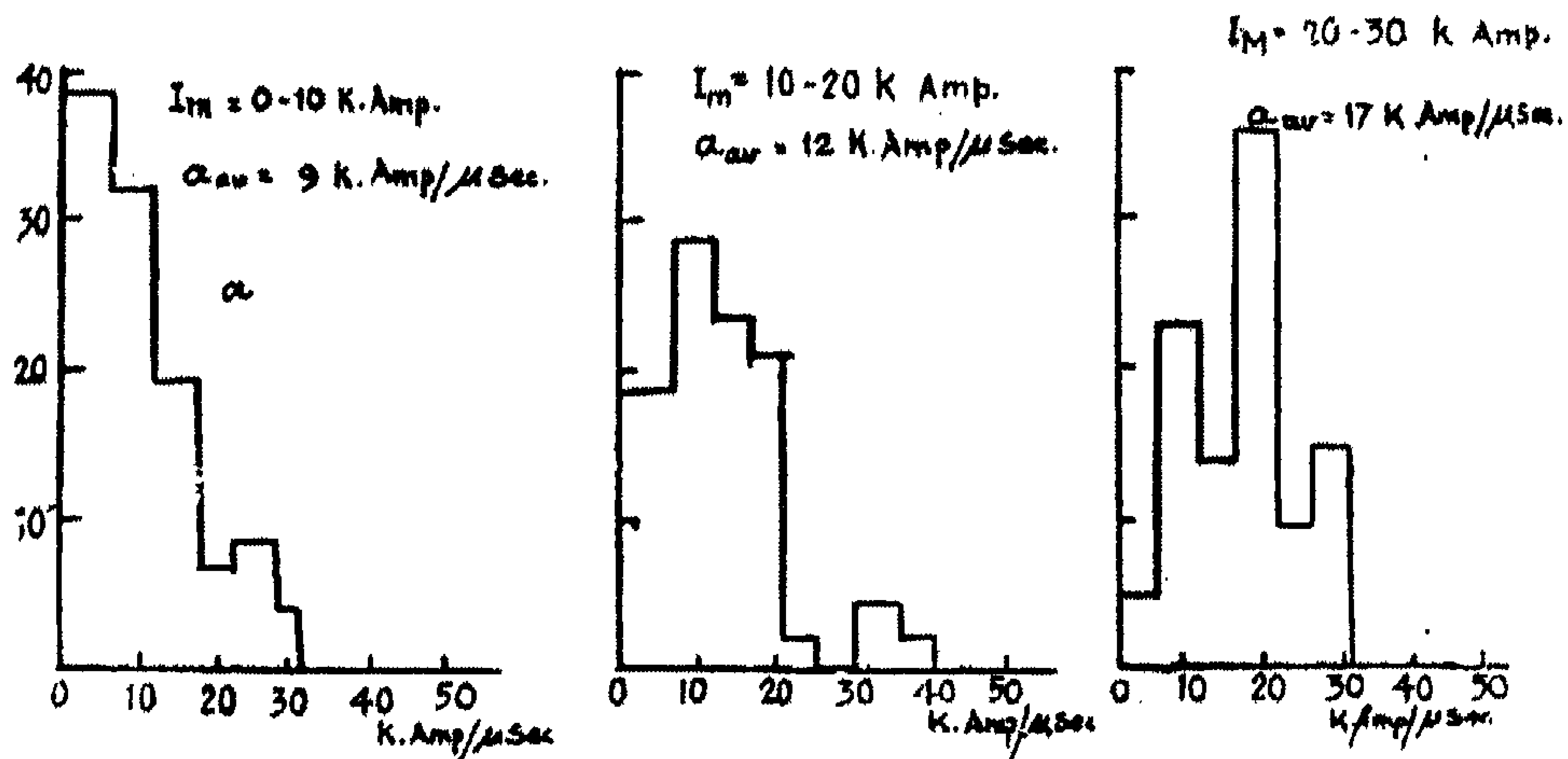
$$\log \nu_a = -\frac{\alpha}{25} \qquad (4.12)$$

وهي مشابهة للمعادلة (12.3) حيث α = الانحدار (kA/µ sec.).

لغرض عملي، يكون غير كافي غالباً أن نعرف انحدار وسعة التيارات منفصلة، فمن الأساس أن نحصل على معلومات عن علاقة هذه الكميات مع بعضها البعض. وقد أوضحت البيانات التجريبية المتاحة عدم وجود علاقة مفردة-القيمة بين هذه الكميات، ولذلك عند كل قيمة للسعة، يمكن أن يأخذ الانحدار قيم مختلفة. وكمثال، موضح في الشكل 12.6 منحنيات توزيع الانحدار لثلاثة فترات مختلفة لتيارات الصاعقة. صفة هذه المنحنيات -قبل كل شيء- تشهد على عدم كفاية كمية البيانات التجريبية، ولكن بالإضافة إلى ذلك، تسمح بكشف ميل محدد كامل لزيادة متوسط الانحدار مع أي زيادة في سعة تيار الصاعقة.



الشكل 12.5: احتمالات انحدار تيارات الصواعق

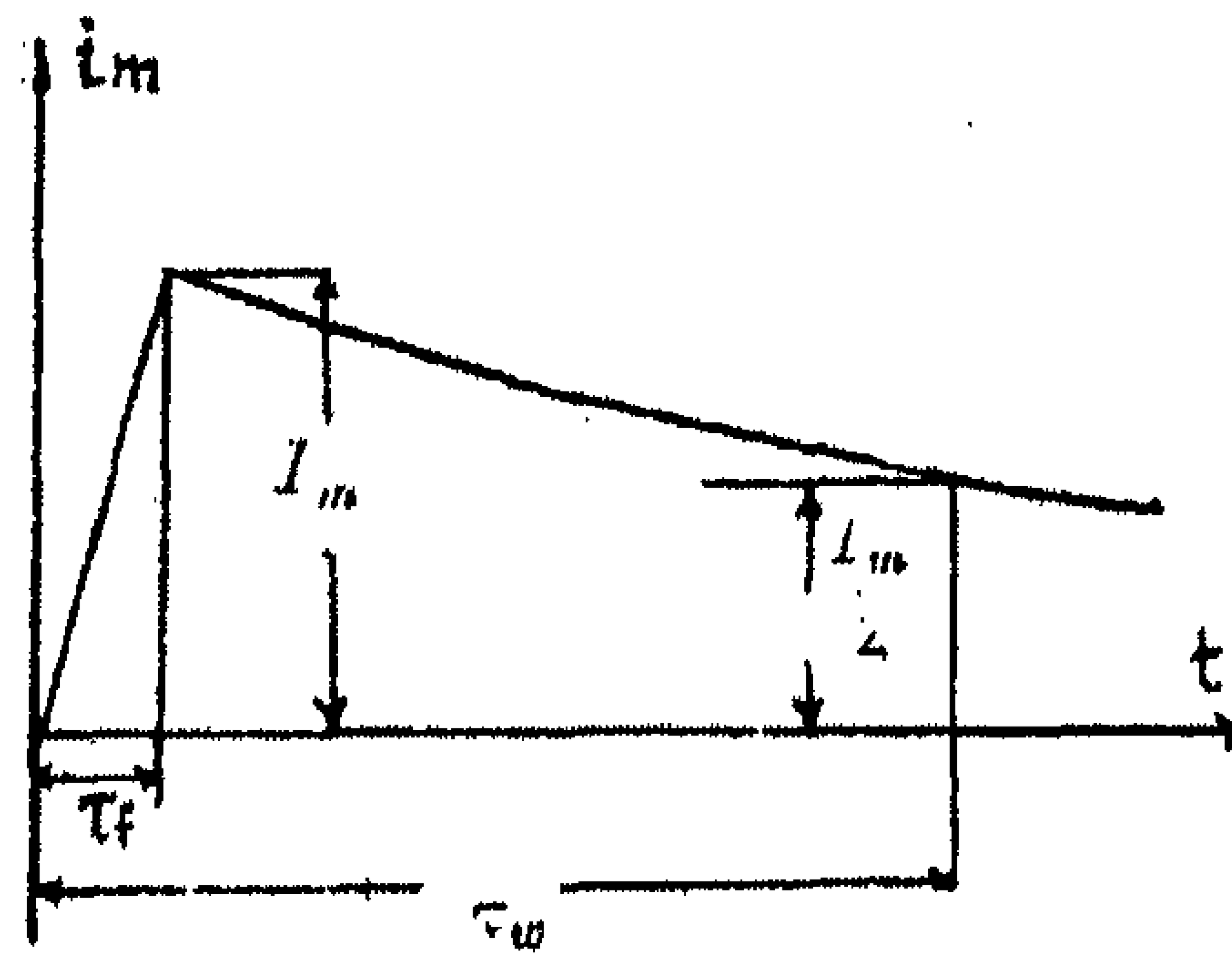


الشكل 12.6: منحنيات توزيع انحدار تيارات الصاعقة لفترات مختلفة من تيارات الصاعقة

١٢-٣ الشكل النظري لموجة تيار الصاعقة Theoretical Form of the Lightning Current Wave

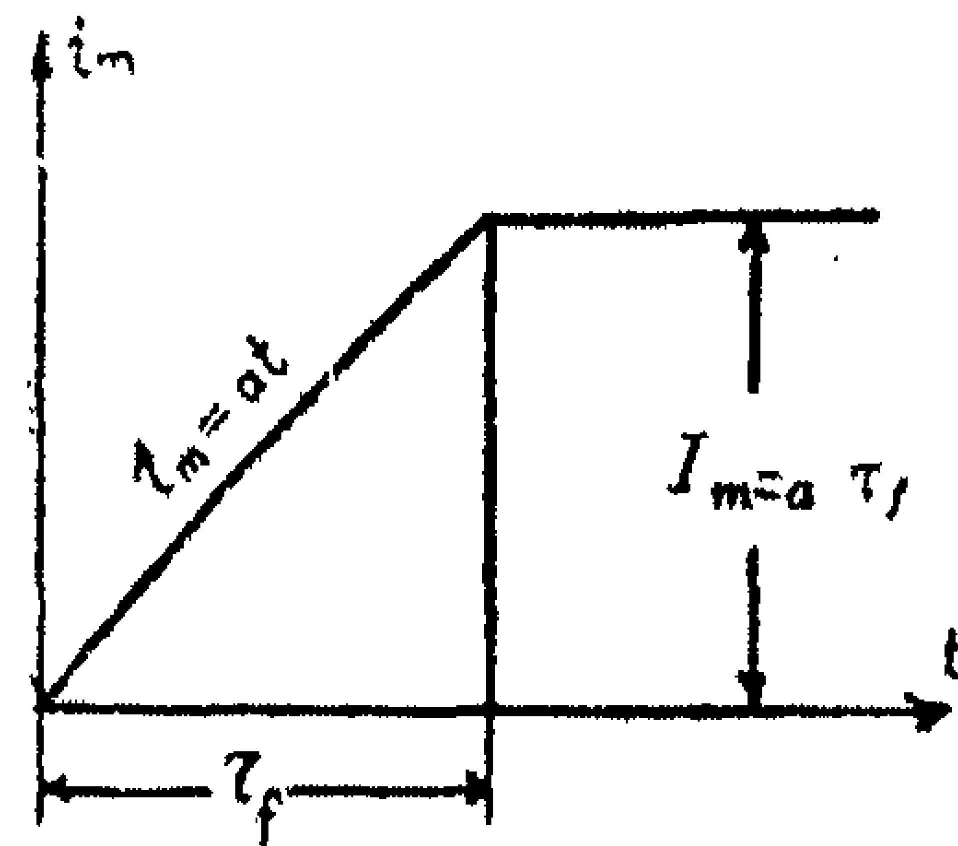
موجة التيار لتفريغ صاعقة مفرد له شكل دَفْعَة [نبضة] [الشكل 12.4]. الشكل الفعلي لموجة التيار له عدد من الذبذبات على مُقَدم [جبهة] الموجة وأيضاً على ذيلها. هذه الذبذبات

للتفريغات المنفصلة لها صفة مختلفة تماماً. ذبذبات التيار هذه تكون مرتبطة بوجود تفرعات في قناة الصاعقة، ومن وجهة نظر الوقاية من الصاعقة، لها أهمية ثانوية. إذن –في الحالة العامة– فإن موجة تيار الصاعقة الموضح في الشكل 12.7، يمكن أن يستخدم للحسابات. هذه الموجة تتميز بنمو خطي للتيار على مقدم [جبهة] الموجة حسب القانون $i_m = \alpha t$ وبهبوط أسي على ذيل الموجة.

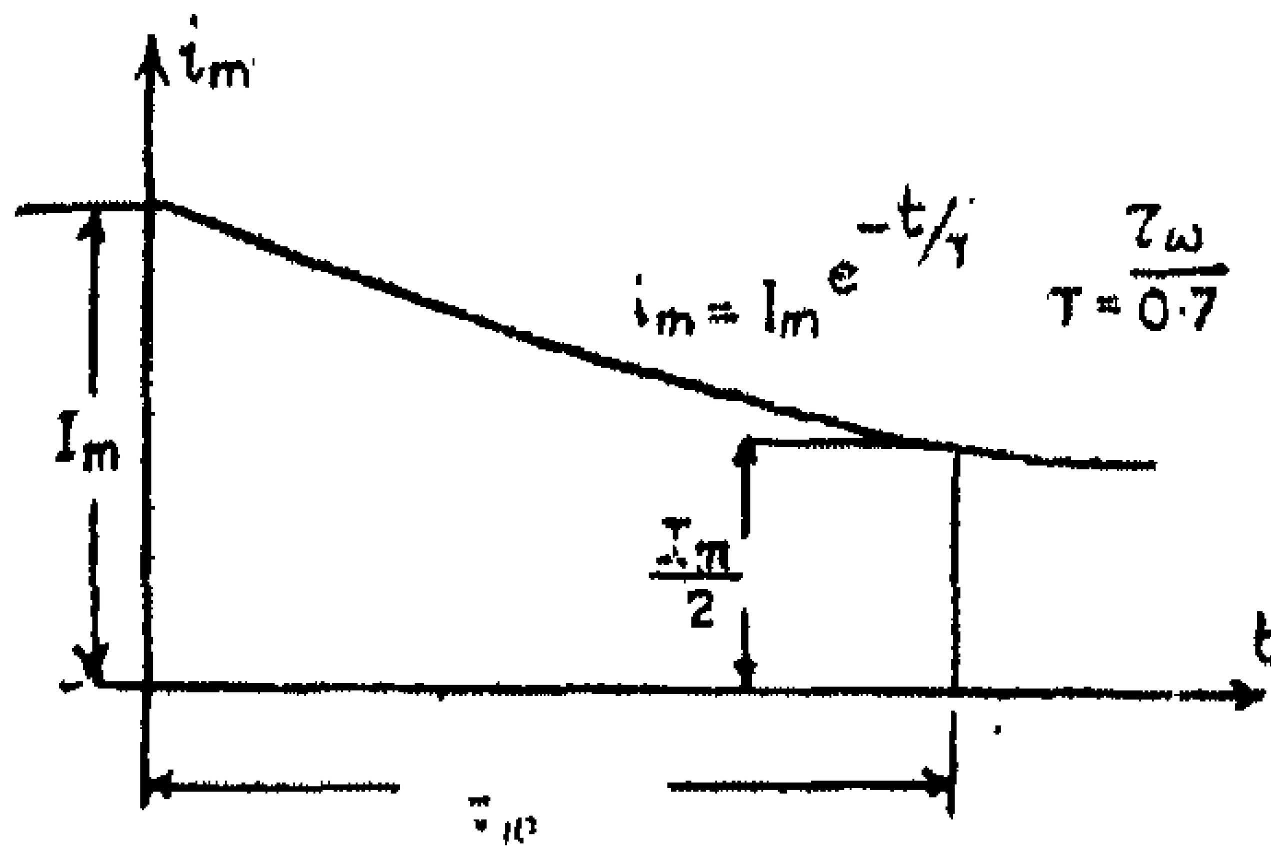


الشكل 12.7: موجة تيار الصاعقة المستخدم في الحسابات [حالات عامة]

ومع ذلك، فإن استخدام شكل الموجة هذا في عدد من الحالات يُعقد الحسابات، ويعتمد على خواص المسائل، وغالباً ما تستخدم أشكال الموجة البسيطة الموضحة في الشكلين 12.8، 12.9.



الشكل 12.8: موجة تيار صاعقة ذات جبهة مائلة $(\tau_w = \infty)$ لحساب العمليات التي تحدث على جبهة الموجة



الشكل 12.9: موجة تيار صاعقة أسي $(\tau_w = 0)$ لحساب العمليات التي تحدث على ذيل الموجة

الموجة ذات الجبهة المائلة [الشكل 12.8] تستخدم تلك الحالات عندما نعرف قبل التعامل أن العملية التي تحت الفحص تحدث على جبهة الموجة أو في أي حالة أثناء زمن أقل من

الطول الموجي. في هذه الحالة، يكون تخفيض التيار بعد الأقصى ليس بذات قيمة وعند $t > \tau_f$ يمكن اعتبار تيار الصاعقة ثابت ويساوي I_m في السعة.

الموجة الأسية [الشكل 12.9] –على العكس– يمكن أن تستخدم في الدوائر التي فيها قيم الكميات تحت البحث عند الأزمنة الكبيرة $t >> \tau_f$ ذات أهمية أساسية عندما يكون وجود جبهة التيار الصاعق ليس بذات قيمة عملية.

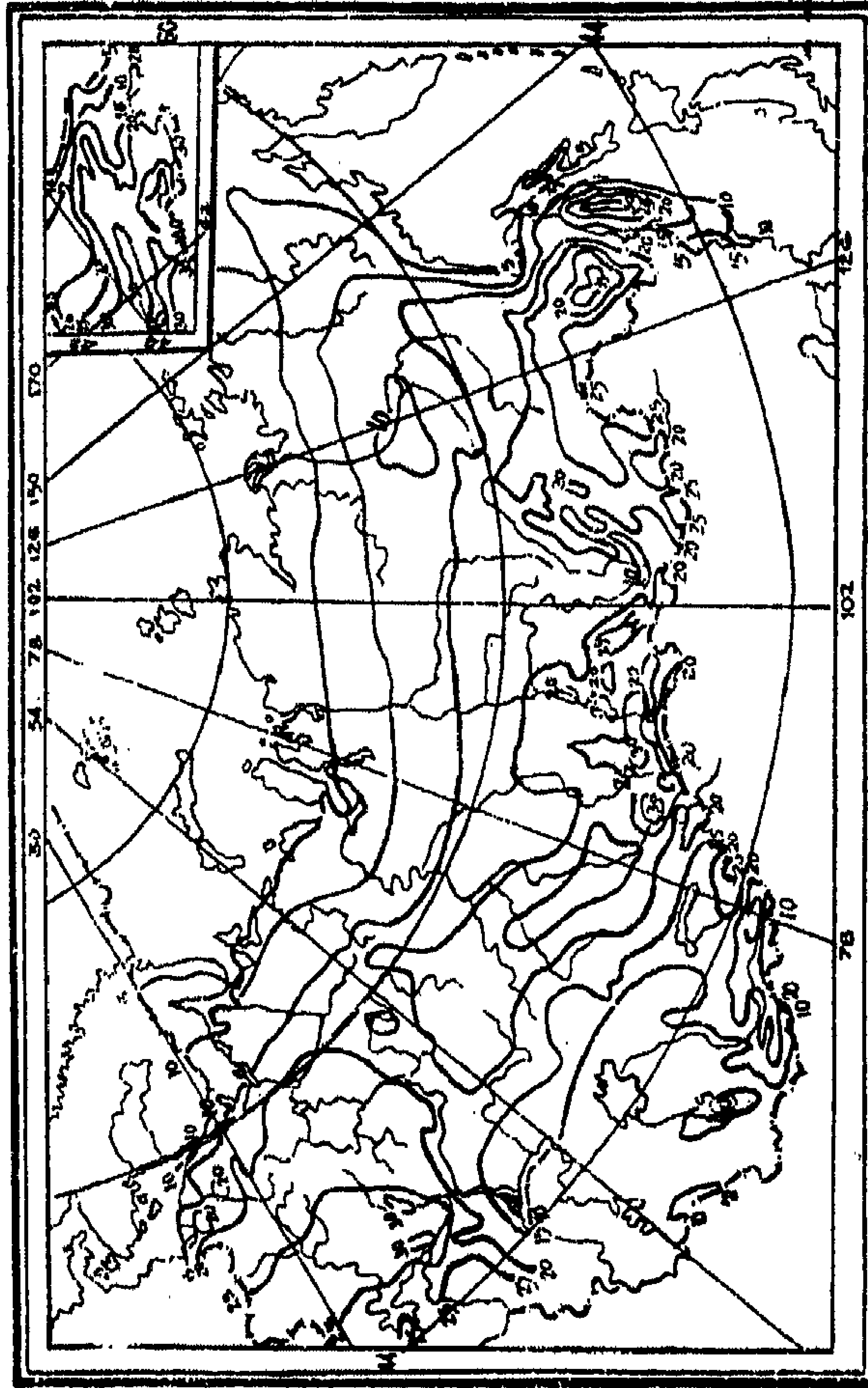
١٢-٤ شدة نشاط الصاعقة [البرق] Intensity of Lightning Activity

شدة نشاط الصواعق على أرض الاتحاد السوفيتي السابق ودول العالم الأخرى تختلف اختلافاً واسعاً. كقاعدة، فإن عدد تفريغات الصواعق على مدار السنة يكون أدنى في المناطق الشمالية ويتزايد تدريجياً في اتجاه الجنوب، حيث درجة الحرارة العالية ورطوبة الهواء العالية تعمل على ترويج تكون السحب الرعدية. ومع ذلك، فإن هذا الميل لا يلاحظ دائماً، حيث توجد أماكن للصواعق الشديدة عند خطوط الطول الوسطى [مثلاً عند منطقة مدينة كييف]، حيث تنشأ ظروف مواتية لتكون سحب الرعد المحلية.

من الممارسة المقبولة أن نميز شدة نشاط الصواعق بعدد أيامها في السنة n_d أو بفترة الدوام الإجمالية السنوية للصواعق بالساعات n_h. متوسط فترة دوام الصاعقة هي 1.5 ساعة، إذن بين هذه الخصائص توجد علاقة تقريبية هي: $n_h = 1.5 n_d$. عدد أيام الصواعق أو الساعات يحدد بواسطة البيانات المستمدة من المراصد الجوية الموزعة في أراضي الاتحاد السوفيتي. تصنيف البيانات لكثير من السنوات من هذه المراصد تسمح بعمل خرائط لنشاط الصواعق [خرائط أيزوكيرانيكية isokeranic maps] لبعض مناطق الاتحاد السوفيتي السابق. الخطوط ذات الدوام المتساوي للصواعق تدخل في هذه الخرائط [الشكل 12.10].

فترة دوام الصواعق في سنة تحدد عدد تفريغ الصواعق على وحدة سطح من الأرض. وطبقاً للبيانات المتاحة، في مناطق ذات 20 يوم من الصواعق في السنة، فإن $1\ \text{km}^2$ من الأرض يضرب بالصواعق في المتوسط (3–2) مرة في السنة، أو (0.15–0.1) مرة أثناء يوم واحد صاعق.

وتسمح هذه البيانات بتقدير تكرارية ضربات الصواعق على الأغراض المختلفة. فمثلاً، نرى أن ساري رأسي معدني ارتفاعه h يأخذ على نفسه كل تفريغات الصواعق التي ستضرب سطح الأرض الموجودة داخل دائرة نصف قطرها $(3.5\text{–}3)h$. فمع $h = 30\ \text{m}$، فإن المساحة المحمية تساوي حوالي $35000\ \text{m}^2$ أو $0.035\ \text{km}^2$ وفي منطقة ذات 20 يوم صاعقة في السنة، فإن هذا الهدف سيضرب بالصواعق مرة واحدة تقريباً في 15 سنة.



الشكل 12.10 : خريطة أيزوكيرانيكية للاتحاد السوفيتي

١٢-٥ الوقاية من ضربات الصواعق المباشرة بمساعدة موصلات الصواعق

Protection from Direct Lightning Strokes with the Aid of Lightning Conductors

١٢-٥-١ معلومات عامة

General Information

استخدمت موصلات الصواعق كوسيلة حماية من ضربات الصواعق المباشرة كثيراً قبل بداية العصر الحالي، ولكنها اكتسبت اعتراف واسع في أواسط القرن 18 فقط نتيجة لعمل "بنجامين فرانكلين" Benjamin Franklin و"لومونوسوف" Lomonosov.

ويتكون كل موصل صواعق من مستقبل صواعق يبرز فوق الهدف المراد حمايته، شبكة التأريض والموصل الذي يوصل المستقبل بشبكة التأريض وهو معني بحمل تيار الصاعقة بعيداً إلى

الأرض بأمان. ويوجد نوعان مختلفان من موصلات الصواعق:

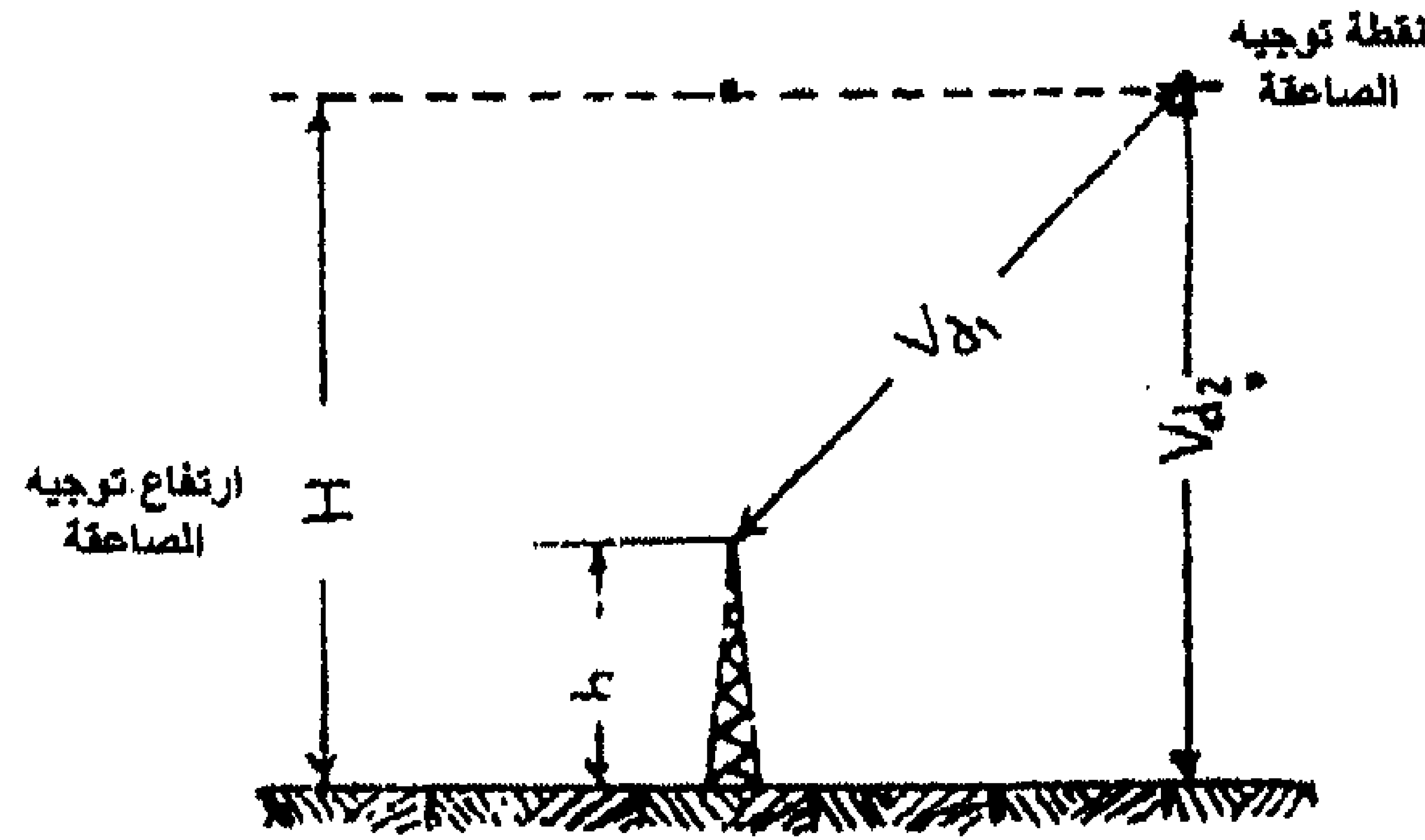
١. سواري الصواعق. ٢. الأسلاك الأرضية.

التأريض الجيد لموصلات الصواعق هو شرط أساسي للحماية التي يعول عليها، حيث في حالة أي ضربة في موصل صاعقة رديء التأريض، تكون الجهود العالية، القادرة على إحداث انهيار الوسط العازل بين موصل الصواعق والهدف تحت الحماية ممكنة. في البداية، قبل الاستخدام واسع النطاق لموصلات الصواعق [القرن 18]، عندما يكن هناك اهتمام لقيمة مقاومة موصل الصاعقة، فإن حوادث الحرائق الناشئة من تفريغات البرق في موصلات الصواعق لم تكن نادرة والتي لعبت دوراً ضاراً في تلك الحالات.

التزود بتوصيل كهربي يعتمد عليه بين كل أجزاء موصل الصاعقة يكون ذات أهمية متساوية، حيث إنه أثناء مرور التيار خلال مكان التلامس الرديء، يحدث قوس شرر شديد، يمكن أن يتسبب في حدوث حرائق.

ويعتمد الفعل الواقي لموصلات الصواعق على حقيقة أن الشحنات المخزنة في طرفها في المرحلة المتقدمة من تفريغ الصاعقة، تنتج شدة المجال الأكبر عبر المسار بين رأس القناة المتقدمة وطرف موصل الصاعقة، حيث يوجه التفريغ. الارتفاع فوق سطح الأرض الذي عنده يوجه التفريغ المتقدم نفسه على أحد الأهداف على الأرض، يسمى "ارتفاع توجيه الصاعقة H" – والذي– يعتمد على ارتفاع موصل الصاعقة h. ومن المعتاد أن نعتبر أنه لموصلات صواعق ارتفاعها حتى 30 m، فإن $H = k\,h$ حيث k هو ثابت التناسب وله قيمة (20–10).

القناة المتقدمة يمكن أن تهبط [تنحدر] إلى الأرض عبر مسارات مختلفة. نفترض أن نقطة توجيه الصاعقة تتحرك بطول خط أفقي، يقع في نفس مستوى موصل الصاعقة، كما هو مبين في الشكل 12.11. عندما تقع هذه النقطة فوق موصل الصاعقة مباشرة، فإن التفريغ يجب أن يحدث في موصل الصاعقة. ومع ذلك، بالتناسب مع إزاحة نقطة التوجيه من موصل الصاعقة فإن احتمال تفريغ الصاعقة إلى الأرض يتزايد. وسيكون الموقع حرجاً عندما تكون جهود الانهيار مع موصل الصاعقة V_{d1} ومع الأرض V_{d2} متساويان. ومع تزايد إزاحة نقطة التوجيه فإن تفريغ الصاعقة سيضرب الأرض أساساً. إذا كان الهدف المطلوب حمايته موجود قريباً من موصل الصاعقة، فإنه لارتفاع محدد لموصل الصاعقة فإن الجهد بين قناة الصاعقة والهدف سيكون دائماً أكبر من جهد الانهيار سواء لموصل الصاعقة أو للأرض وسيكون الهدف محمي من ضربة الصاعقة المباشرة.



الشكل **12.11**: التحديد التجريبي لمنطقة الحماية لساري صاعقة

١٢-٥-٢ منطقة الوقاية لموصلات الصواعق Protective Zone of Lightning Conductors

من المعتاد تسمية الفراغ حول موصل الصواعق والذي تكون فيه ضربة الصاعقة صغيرة "المنطقة الوقائية". ومن حقيقة أن جهود انهيار ثغرات الهواء –خاصة لمسافات تبلغ عشرات الأمتار، يكون لها استطارة إحصائية محسوسة، فإن موصلات الصواعق تضمن الوقاية لأي هدف بدرجة معينة من الاحتمالات فقط.

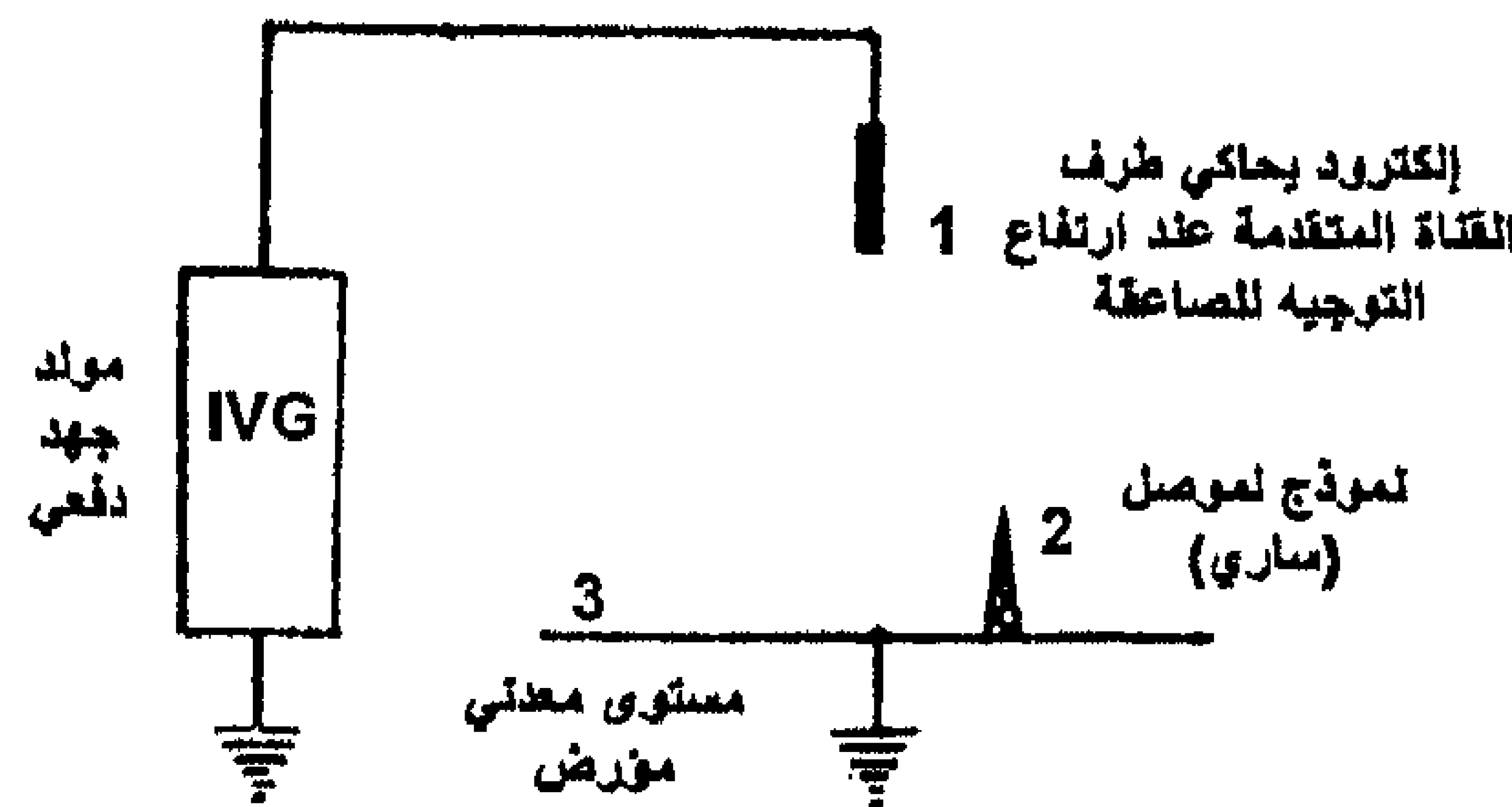
التحديد العملي للمنطقة الوقائية لموصلات الصواعق

Experimental Determination of Protective Zone of Lightning Conductors

يتم تحديد مناطق الوقاية لموصلات الصواعق بتجارب على نماذج. وأثناء ذلك، نفترض أن المناطق الوقائية الفعلية لموصلات صواعق حقيقية ذات ارتفاعات مختلفة تكون متماثلة هندسياً مع المناطق المتحصل عليها في العمل على نماذج.

ويستخدم تفريغ الشرر الدفعي كنموذج للصواعق. ويحدث نموها في ثغرات طويلة في مرحلتين: المتقدمة والرئيسية. وبهذه الطريقة تكون نوعياً متماثلة مع الصواعق.

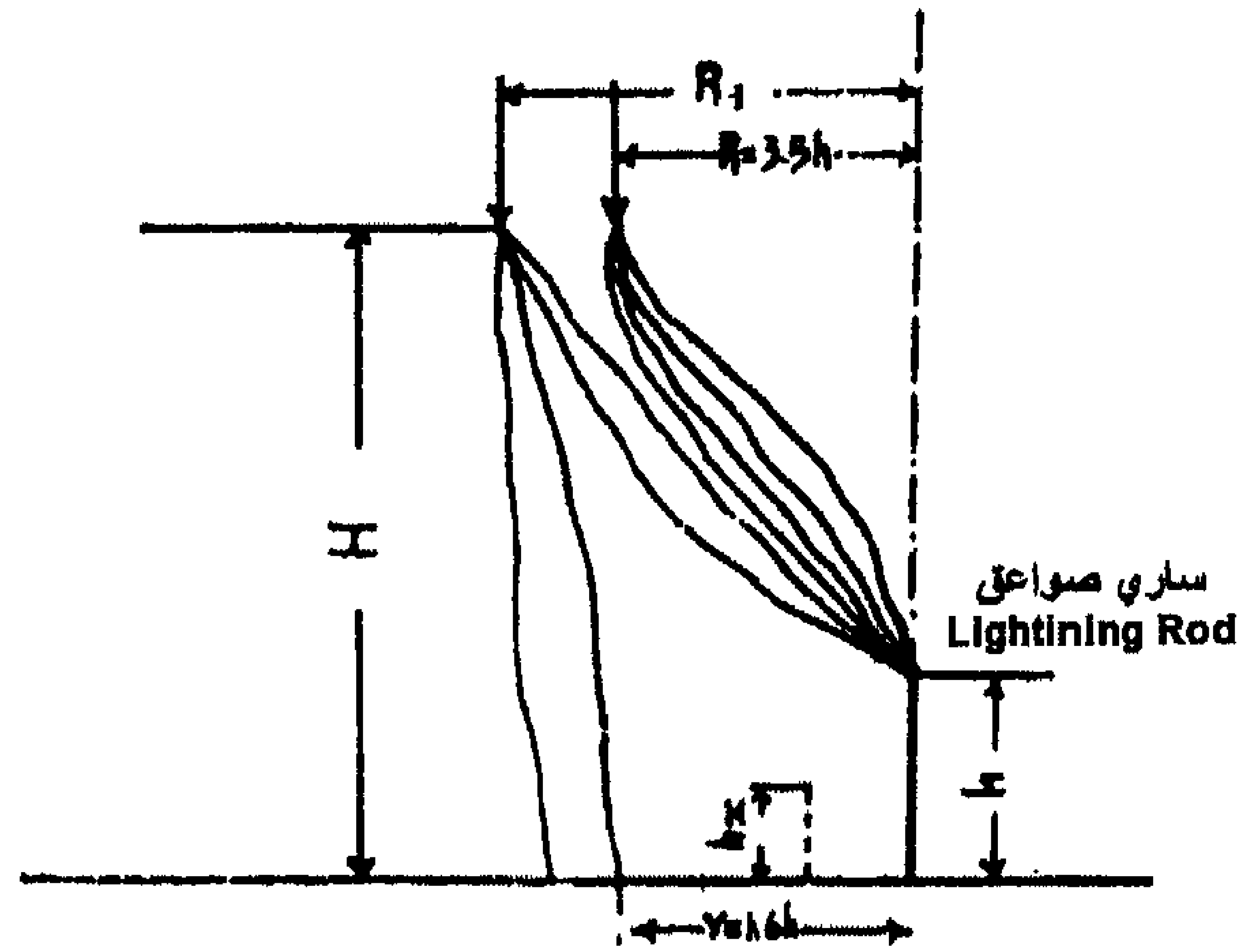
وتنفذ التجارب طبقاً للجهاز التجريبي في الشكل 12.12؛ الإلكترود الذي ينتج منه التفريغ (1) يماثل طرف القناة المتقدمة عند ارتفاع توجيه الصاعقة. في التجارب التي تمت في الاتحاد السوفيتي بواسطة A.A. Akopyan، لأعمدة صواعق يصل ارتفاعها إلى 30 m، أخذت H/h لتساوي 20، وللأسلاك الأرضية $H/h = 10$. وبالنسبة لموصلات الصواعق ذات الارتفاع الأكبر من 30 m، أخذ ارتفاع التوجيه ليكون ثابت [$H = 600$ m لسواري الصواعق، $H = 300$ m للأسلاك الأرضية]. ولا يمكن أن تبرر القيم المأخوذة بصرامة –مع ذلك– توجد قاعدة تفترض أن استخدامها يعطي مناطق وقاية أقل إلى حد ما، وبذلك تضمن هامش محدد من الأمان.



الشكل 12.12 : مخطط للتحديد التجريبي للمنطقة الوقائية

بالرغم من حقيقة أن معظم تفريغات الصواعق إلى الأرض لها قطبية سالبة، إلا أن التفريغات ذات القطبية الموجبة تستخدم أثناء تحديد المناطق الوقائية في المعمل. ويرجع ذلك إلى حقيقة أن مجرى تقابل -يجعل ساري الصاعقة أطول- يتولد من طرفها أثناء ضربه الصاعقة إلى الأهداف المرفوعة. ومع ذلك، فإن طول مجرى التقابل هذا لأعمدة الصواعق ذات الارتفاع حتى 100 m لا تتعدى عشرات قليلة من الأمتار. في ثغرات الشرر هذه التي نتعامل معها في المعمل، يبدأ التفريغ في النمو من ساري الصواعق إذا كانت قطبية الإلكترود العلوي سالبة ونحصل على مناطق وقائية متزايدة. ومع قطبية موجبة للإلكترود العلوي فإن مجرى التقابل من عمود الصواعق يشمل كسر صغير من ثغرة الشرر [حتى $\frac{1}{3}$] والتي تكون أقرب كثيراً من الشروط الحادثة أثناء تفريغات الصواعق. ومع ذلك، فإن ضرورة استخدام هذه القطبية التي لا تحدث في الظروف الطبيعية تكون دليلاً على النموذج المقرب جداً من العملية الحقيقية في المعمل. لذلك، يجب أن نتذكر أن المناطق الوقائية المتحصل عليها في المعمل تكون ذو طبيعة شرطية ويمكن أن نستخدمها، فقط لأن عدة سنوات من الملاحظات والمراقبة لأداء سواري الصواعق الحقيقية تؤكد الاعتماد على التوصيات الصادرة على أساس التجارب المعملية.

تقنية التحديد التجريبي للمناطق الواقية هو كالتالي [الشكل 12.13]: الإلكترود الموضوع عند ارتفاع H، ينقل في الاتجاه الأفقي بالنسبة لنموذج ساري الصاعقة. ولكل موقع للإلكترود ينتج عدد محدد من التفريغات. وقد أظهرت التجارب أنه بالنسبة للعلاقة $R = 3.5h$ فإن كل التفريغات تضرب ساري الصواعق. ولكن بالنسبة لـ R_1 أكبر من R، فإن جزء من التفريغات يضرب الأرض. وأثناء ذلك، تنحرف التفريغات كثيراً جداً بعيداً عن الرأس وتضرب الأرض عند مسافة $r \geq 1.6h$ الكمية r هي نصف قطر المنطقة الواقية عند مستوى الأرض. المسافة R تسمى نصف قطر منطقة 100% ضربات لساري الصواعق.

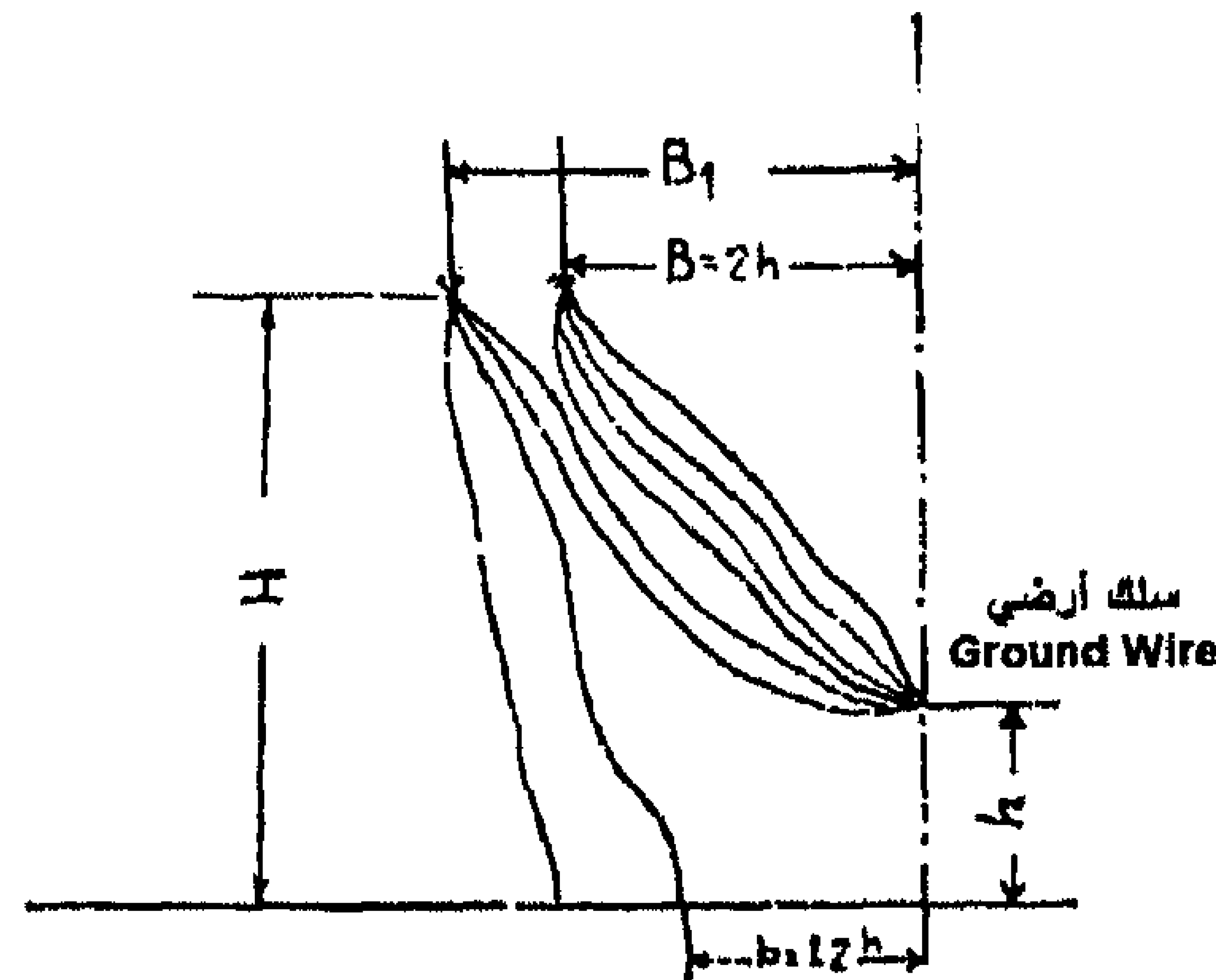


الشكل 12.13: تحديد منطقة الوقاية لساري صواعق على نموذجه

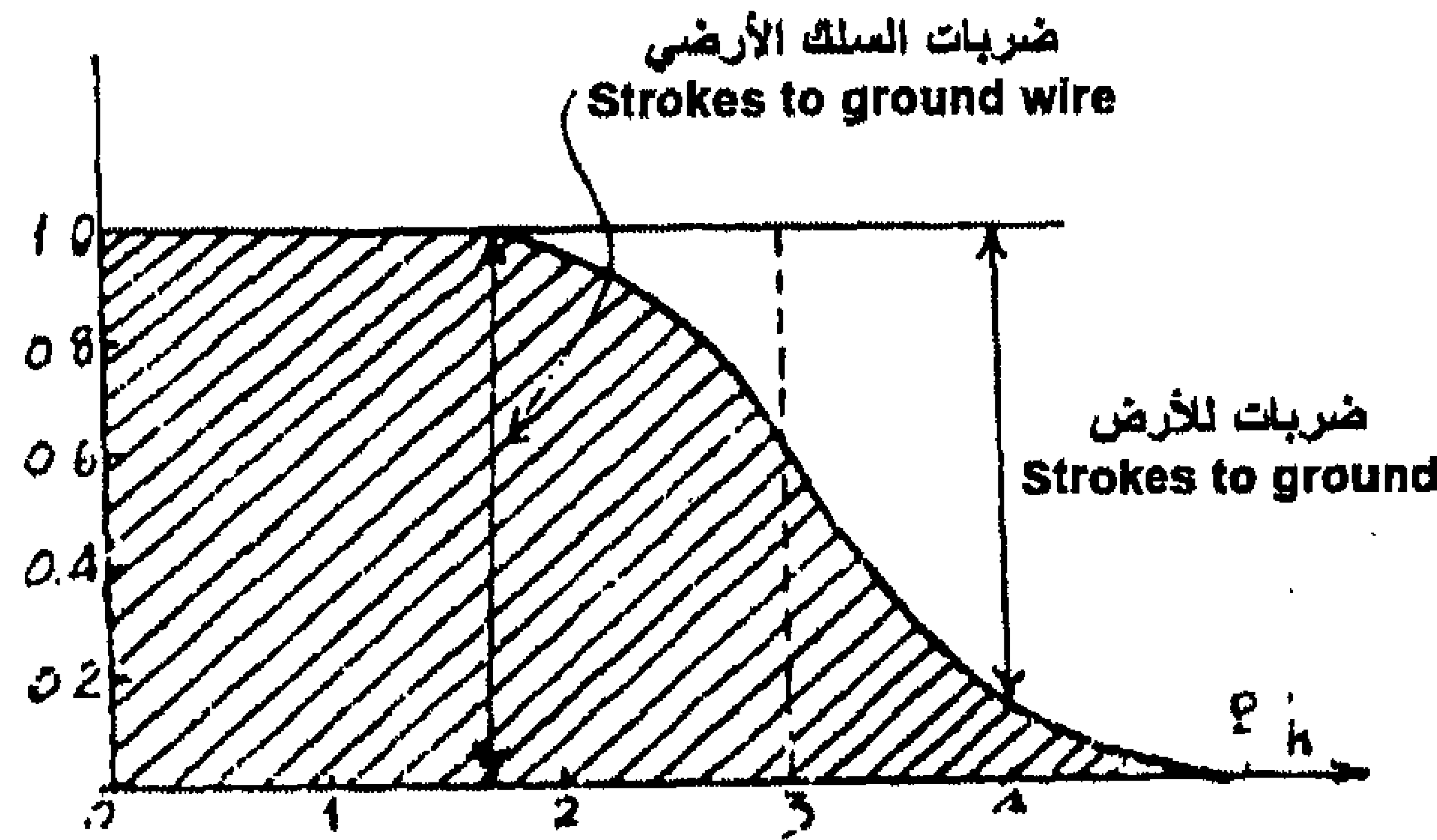
المنطقة الواقية عند ارتفاع h_x تحدد بمساعدة ساري ارتفاعه h_x يمثل نموذج للهدف المراد حمايته. إلكترود ونموذج الهدف الموجود مبدئياً في نفس المستوى، تزاح بالنسبة لبعضها البعض وفي علاقة بنموذج ساري الصواعق. لكل موقع متبادل للإلكترود يتم توصيل عدد محدد من التفريغات. وكنتيجة، نوجد أقصى مسافة r_x بين نموذج الهدف وساري الصواعق والتي عندها لا يُضرب نموذج الهدف بواسطة التفريغ. هذه المسافة r_x هي نصف قطر المنطقة الواقية للنموذج من ساري الصواعق عند ارتفاع h_x.

وكلما زاد عدد التفريغات لكل موقع للإلكترودات، زادت دقة تحديد نصف قطر المنطقة الواقية وصغر احتمال ضرب نموذج الهدف الموجود في المنطقة الواقية لنموذج ساري الصواعق. عادة تُحدد المناطق الواقية مع احتمال ضرب لنموذج الهدف يساوي 0.1%.

إذا كان موصل الصواعق ليس ساري صواعق بل سلك أرضي، فإن الإلكترود والهدف يُزاحان بطول الأفقي في المستوى العمودي على السلك الأرضي [الشكل 12.14]. وتبين الخبرة أنه في هذه الحالة فإن أبعاد المنطقة الواقية تكون $b=1.2h$، وأبعاد منطقة 100% ضرب نموذج السلك الأرضي تساوي $B=2h$. وإذا تم إزاحة الإلكترود أكثر، تزداد المسافة حتى المستوى الرأسي والتي يتواجد فيها السلك الأرضي. ضربات أصغر ستحدث للسلك الأرضي وفي النهاية، عند مسافة معينة، ستحدث كل التفريغات للأرض فقط. توزيع الضربات المحددة تجريبياً موضحة في الشكل 12.15 ومنه نرى أن كل تفريغات الصواعق في المتوسط، تظهر عند مسافة $B \leq 3h$ من السلك الأرضي.



الشكل 12.14: تحديد المنطقة الواقية لسلك أرضي على نموذجه



الشكل 12.15: توزيع التفريغات بين السلك الأرضي والأرض

مناطق وقاية سواري الصواعق Protective Zones of the Lightning Masts

المنطقة الواقية لساري صواعق مفرد ارتفاعه حتى 30 m [الشكل 12.16] هو فراغ مُحاط بسطح دوراني لمنحنى يمكن إيجاده من العلاقة التالية:

$$r_x = \frac{1.6}{1+\frac{h_x}{h}}(h-h_x) \tag{5.12}$$

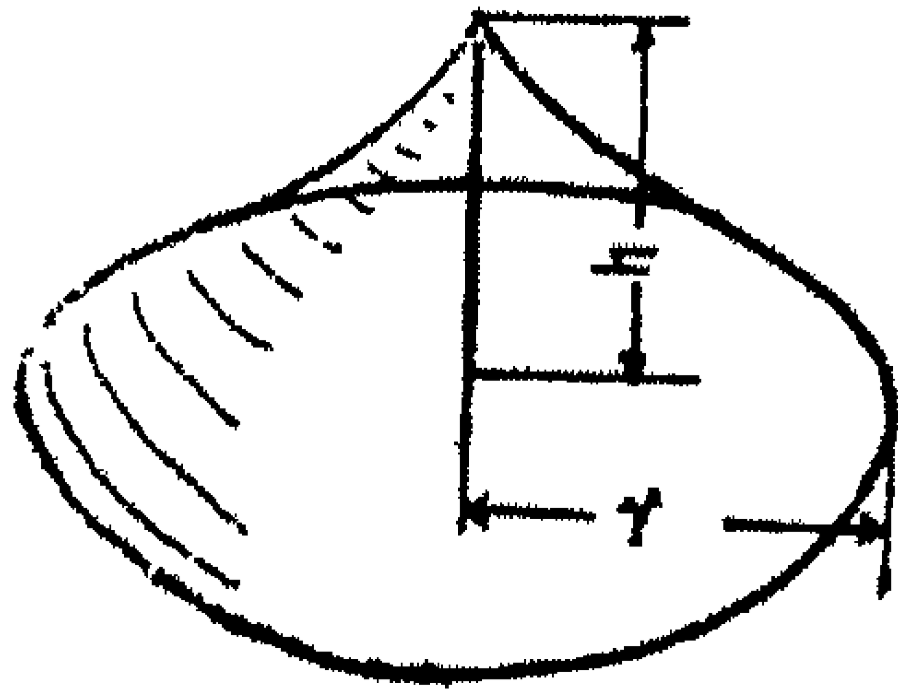
حيث h = ارتفاع موصل الصواعق.

r_x = نصف قطر المنطقة الواقية عند ارتفاع h_x.

h_x = المستوى تحت الفحص فوق سطح الأرض [أو ارتفاع الهدف المراد حمايته].

$h_a = h - h_x$ هو مسقط ارتفاع موصل الصواعق فوق المستوى تحت الفحص [أو فوق ارتفاع الهدف المحمي]، ويسمى الارتفاع الفعال لموصل الصواعق.

ولكي نكون محميين من ضربات الصاعقة المباشرة، يجب أن يتمركز الهدف بالكامل داخل المخروط الفراغي الذي يمثل المنطقة الواقية لساري الصواعق.



الشكل 12.16: منطقة حماية ساري صواعق

وحيث إنه أثناء التحديد التجريبي للمنطقة الوقائية يُسمح بعدد من الترحيلات عن الشروط الحقيقية، فلا توجد حاجة لاستغلال الحدود الدقيقة لمناطق الوقاية، والتي تصبح معقدة في حالة الحماية بواسطة 2 ساري صواعق. ومن المكن استغلال التركيب المبسط الموضح في الشكل 12.17. السطح المتولد الذي يحوي المنطقة الواقية يمكن أن يمثل بواسطة خط منكسر. أحد قطاعات هذا الخط المنكسر ab هو جزء من الخط المستقيم الذي يوصل قمة موصل الصواعق ونقطة على سطح الأرض على مسافة $0.75h$ من محور ساري الصواعق. والقطاع الآخر bc هو جزء من الخط المستقيم الذي يوصل نقطة على موصل الصواعق عند ارتفاع $0.8h$ ونقطة على سطح الأرض موضوعة على مسافة $1.5h$ من محور ساري الصواعق. المنطقة الواقية المتكونة حسب المعادلة (12.5) موضحة أيضاً في نفس الشكل للمقارنة.

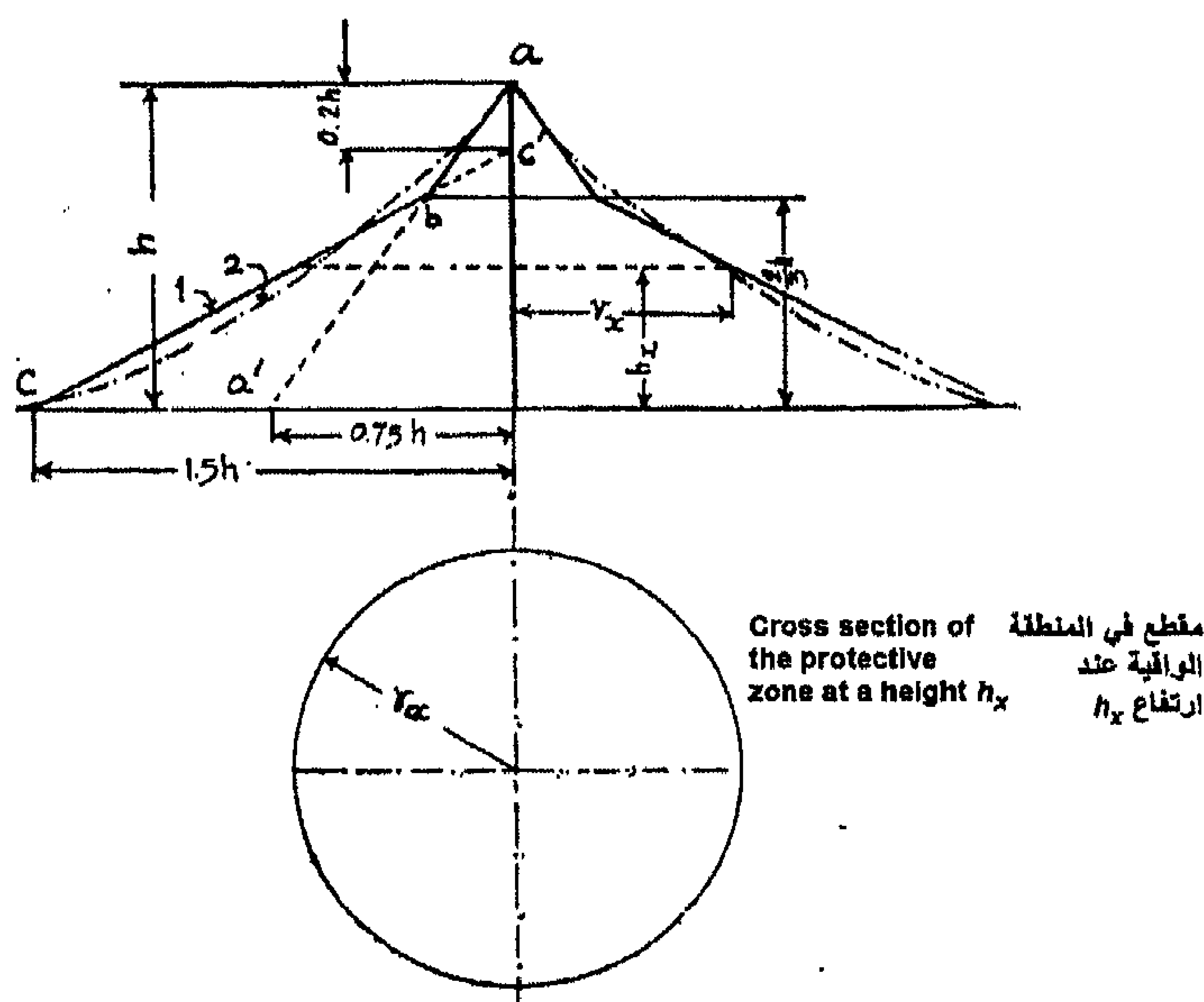
من الشكل 12.17 من الواضح أن النقطة b موجودة عند ارتفاع يساوي $\frac{2}{3}h$. ومن السهل أن نرى أن نصف قطر الوقاية عند مستوى $h_x < \frac{2}{3}h$ يساوي:

$$r_x = 1.5h\left(1 - \frac{h_x}{0.8h}\right) \qquad (6.12)$$

ونصف قطر الوقاية عند مستوى $h_x > \frac{2}{3}h$ يساوي:

$$r_x = 0.75h\left(1 - \frac{h_x}{h}\right) \qquad (7.12)$$

فعالية سواري الصواعق ذات الارتفاعات الأكبر من 30 m تصبح أقل، حيث أثناء ذلك يبقى ارتفاع توجيه الصاعقة ثابت.



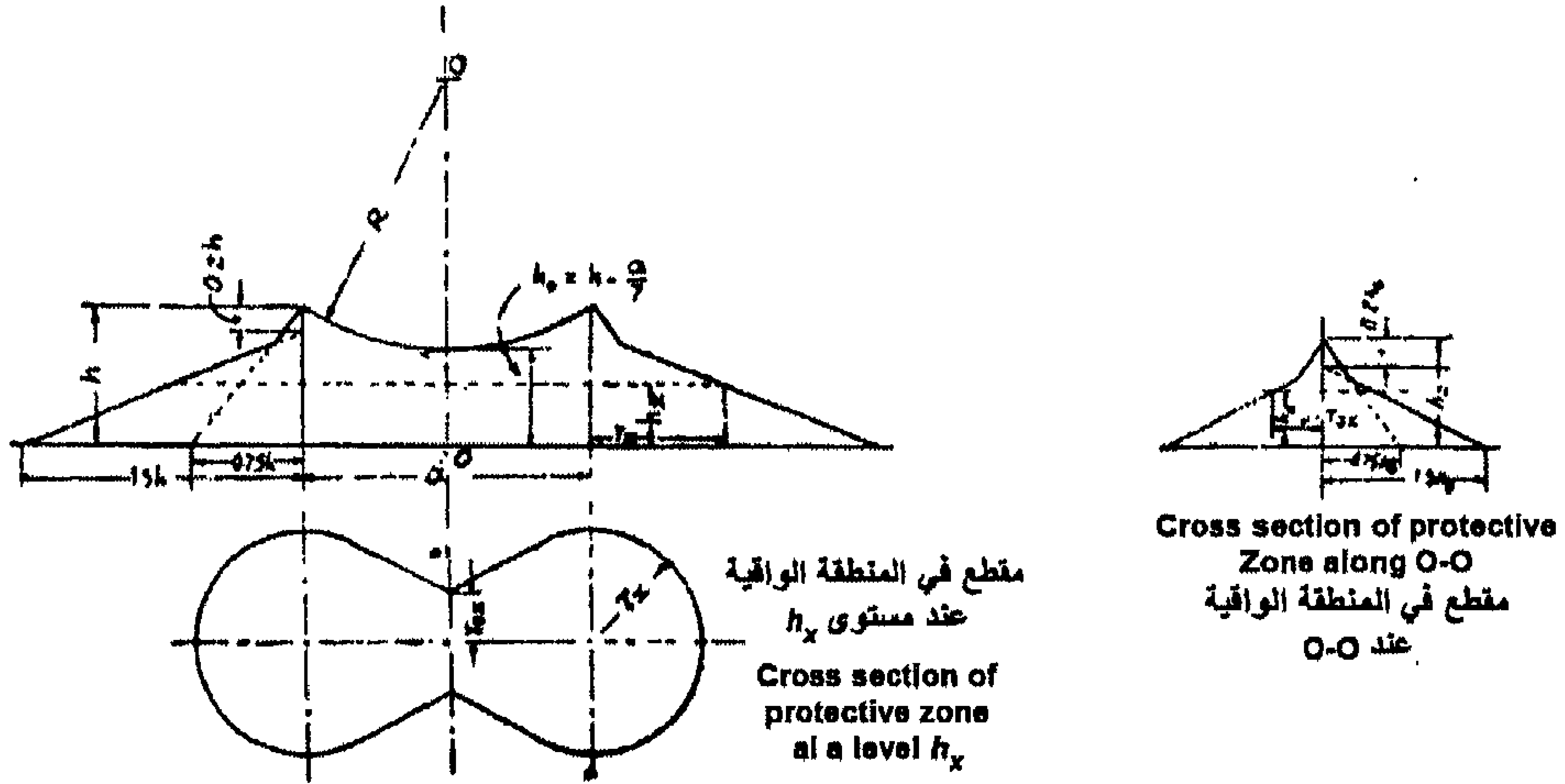
الشكل 12.17: إنشاء المنطقة الواقية لساري صواعق مفرد.
(1) إنشاء مبسط؛ (2) المنطقة الواقية المنشأة من المعادلة (12.5)

ولتحديد نصف قطر المنطقة الواقية لساري صواعق ذو ارتفاع $h > 30\text{ m}$ ، فإن القيم المتحصل عليها من المعادلتين (12.6)، (12.7) يجب أن تضرب في المعامل p حيث $p = 5.5/\sqrt{h}$. وينفذ إنشاء المنطقة الواقية بنفس الطريقة كما في الشكل 12.17، ولكن الخطوط المستقيمة aa' ، cc' ترسم خلال نقط على سطح الأرض موجودة على مسافات $0.75hp$ ، $1.5hp$ على الترتيب من محور ساري الصواعق.

المنطقة الواقية بين اثنين من سواري الصواعق لها أبعاد أكبر من مجموع المناطق الواقية لاثنين من سواري الصواعق منفردين. وسبق الذكر بعاليه أن نصف قطر 100% ضربات لساري الصواعق هو $R = 3.5h$. ومن الواضح، إذا وضع اثنان من سواري الصواعق عند مسافة $a = 7h$ فإن النقطة التي تقع على سطح الأرض في منتصف المسافة بينهم لن تضرب بالصاعقة. وإذا كان من الضروري حماية نقطة موجودة في المنتصف بين الساريين على ارتفاع h_0 فإن المسافة بين الساريين ذات الارتفاع h يجب أن تكون $a \le 7(h - h_0)$ ، أي أنها يجب ألا تكون أكبر من سبعة أمثال الارتفاع الفعال لسواري الصواعق. أو، إذا كان ارتفاع سواري الصواعق والمسافة بينهما معروفة، فإن ارتفاع نقطة تقع بينهما في المنتصف وستحمى من تفريغ الصواعق تكون كالآتي:

$$h_0 = h - \frac{a}{7} \tag{8.12}$$

الجزء الداخلي من المنطقة الواقية لساريين [الشكل 12.18] في مستوى يمر خلال كل من سواري الصواعق يكون محاطاً بقوس من دائرة يمكن إنشائها على ثلاث نقط: اثنان منهم هما قمم سواري الصواعق والثالثة موجودة في المنتصف بين سواري الصواعق على ارتفاع h_0. مقطع مستعرض للمنطقة الواقية في مستوى عمودي على مستوى الشكل 12.18 [مبين في اليسار] ينشأ بنفس الطريقة كما في حالة ساري الصواعق المفرد ذات الارتفاع h_0 [مقطع عبر 0–0 في الشكل 12.18 في اليمين]. الجزء الخارجي من المنطقة الواقية لسواري الصواعق يحدد بنفس الطريقة كما هو بالنسبة لساري الصواعق المفرد.



الشكل 12.18: المنطقة الواقية لعدد 2 ساري صواعق

ولعدد اثنين ساري صواعق ذات ارتفاع $h > 30\ \text{m}$ ، تحدد النقطة h_0 كالآتي:

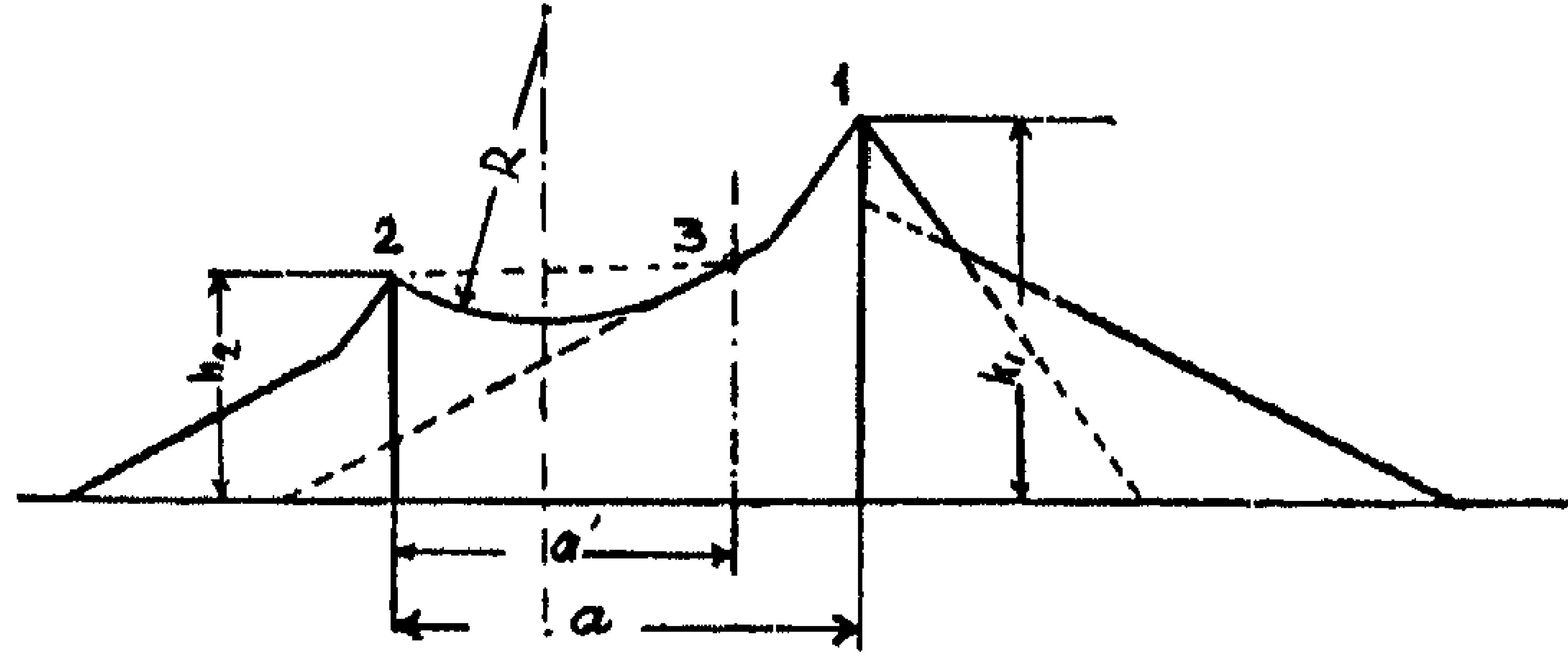
$$h_0 = h - \frac{a}{7p}$$

حيث

$$p = \frac{5.5}{\sqrt{h}} \tag{9.12}$$

أنصاف أقطار المنطقة الواقية في المقطع 0–0 تكون بالمثل منخفضة بـ p مرة. إنشاء المناطق الواقية لساريين صواعق ذات ارتفاعات مختلفة موضح في الشكل 12.19.

يتم إنشاء المنطقة الواقية لساري الصواعق الأعلى أولاً. وبعد ذلك من خلال قمة ساري الصواعق ذو الارتفاع الأصغر يرسم خط أفقي حتى يتقاطع مع المنطقة الواقية لساري الصواعق المفرد ذات الارتفاع الأعلى.



الشكل 12.19: المنطقة الواقية لعدد 2 ساري صواعق ذات ارتفاعات مختلفة

نفترض أن قمة ساري صواعق خيالي تنطبق مع نقطة التقاطع هذه (3) ثم تُنشأ المناطق الواقية لسواري الصواعق (2)، (3) ذات نفس الارتفاع h_2 والمتواجدة عند مسافة a' بينهما.

تقام أهداف مثل معدات المحطات الفرعية الخارجية للتوزيع على مساحة كبيرة كافية من الأرض. ويجب أن يتم حمايتها بواسطة عدد من سواري الصواعق. في هذه الحالة، يُحدد الجزء الخارجي من المنطقة الواقية بنفس الطريقة كما في حالة المنطقة الواقية لساريين كما سبق. الجزء الداخلي للمنطقة الواقية لعدد من سواري الصواعق لا ينشأ. أي هدف ارتفاعه h_x يقام داخل المثلث [أو المستطيل] المتكون من سواري الصواعق سيتم حمايته في حالة $D \leq 8h_a$ حيث D قطر الدائرة المارة خلال قمم سواري الصواعق الثلاث [أو وتر المستطيل الذي تقع عند أركانه سواري الصواعق الأربعة]، h_a هو الارتفاع الفعال $(h_a = h - h_x)$ لسواري الصواعق، أي أن شرط إنتاج المساحة بين سواري الصواعق عند مستوى h_x هو:

$$D \leq 8h_a$$

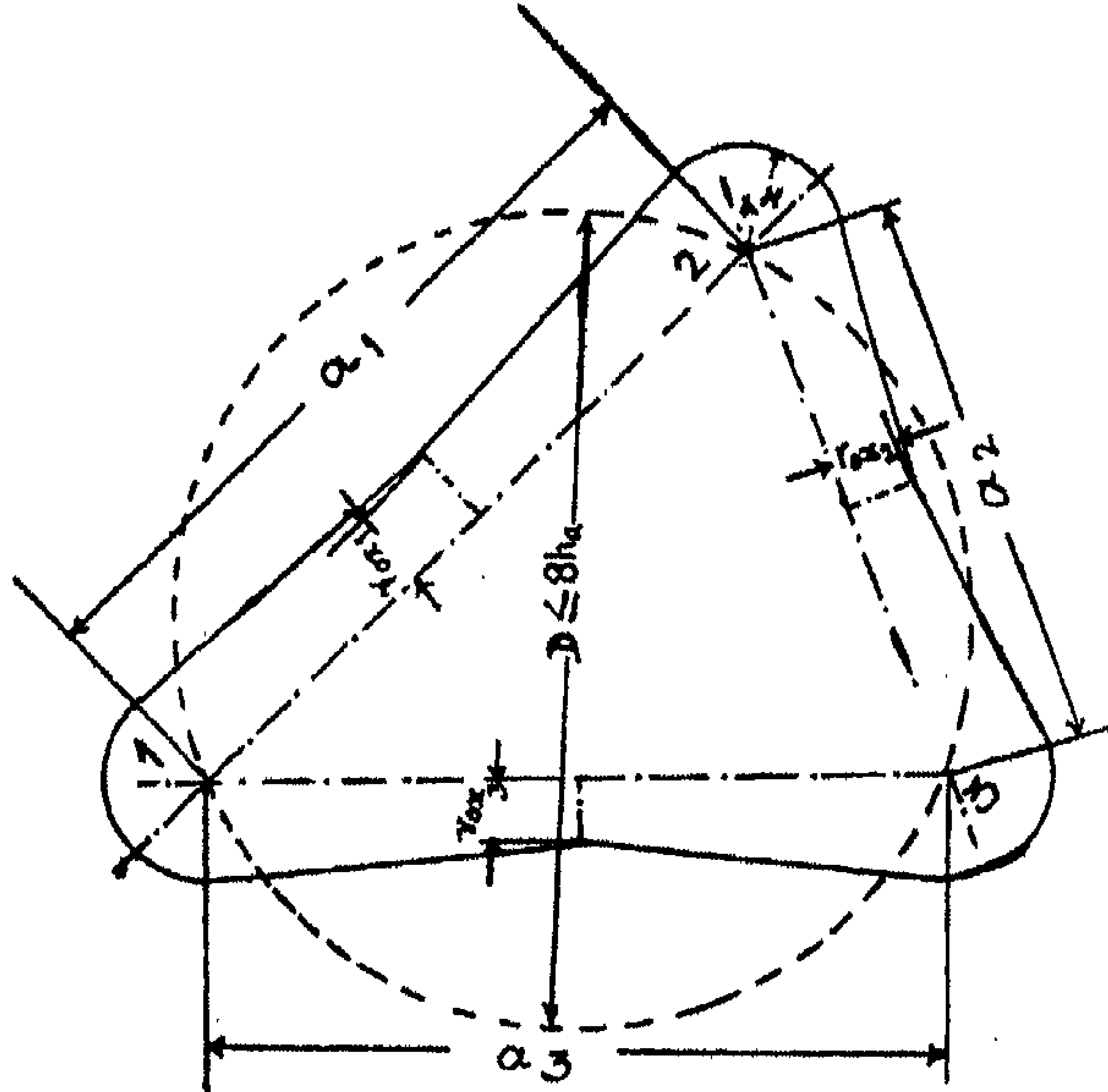
$$D \leq 8(h - h_x) \qquad (10.12)$$

المناطق الواقية عند مستوى h_x لثلاث وأربع سواري صواعق موضحة في الشكلين 12.20، 12.21.

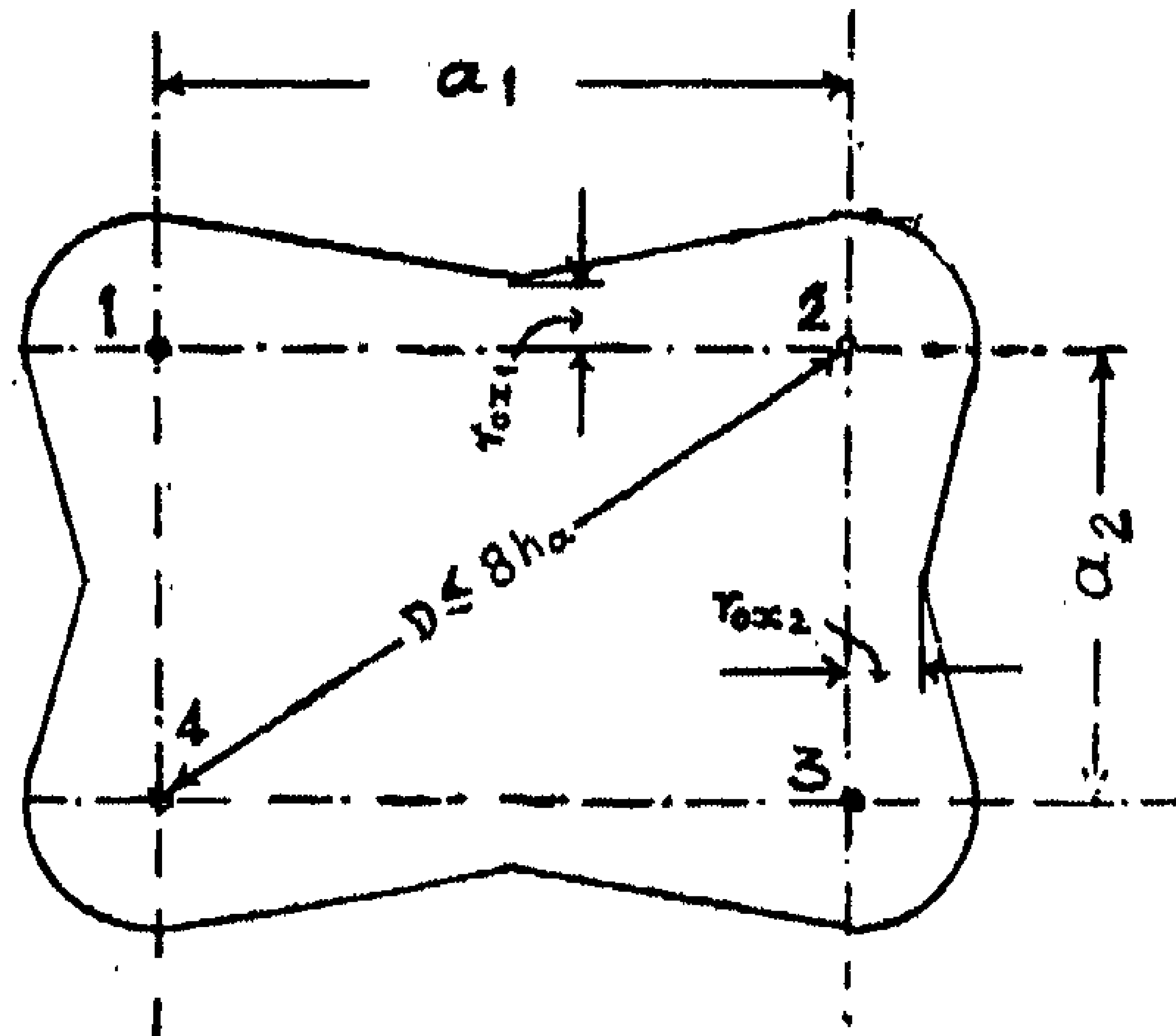
لتحديد الموقع الاختياري لسواري الصواعق فإن الشرط السابق يجب أن يتحقق لكل مجموعة من ثلاث سواري صاعقة متقاربة.

وإذا تعدى ارتفاع سواري الصواعق 30 m، فإن شرط الحماية عند مستوى h_x سيكون:

$$D \leq 8(h-h_x)p \qquad (11.12)$$



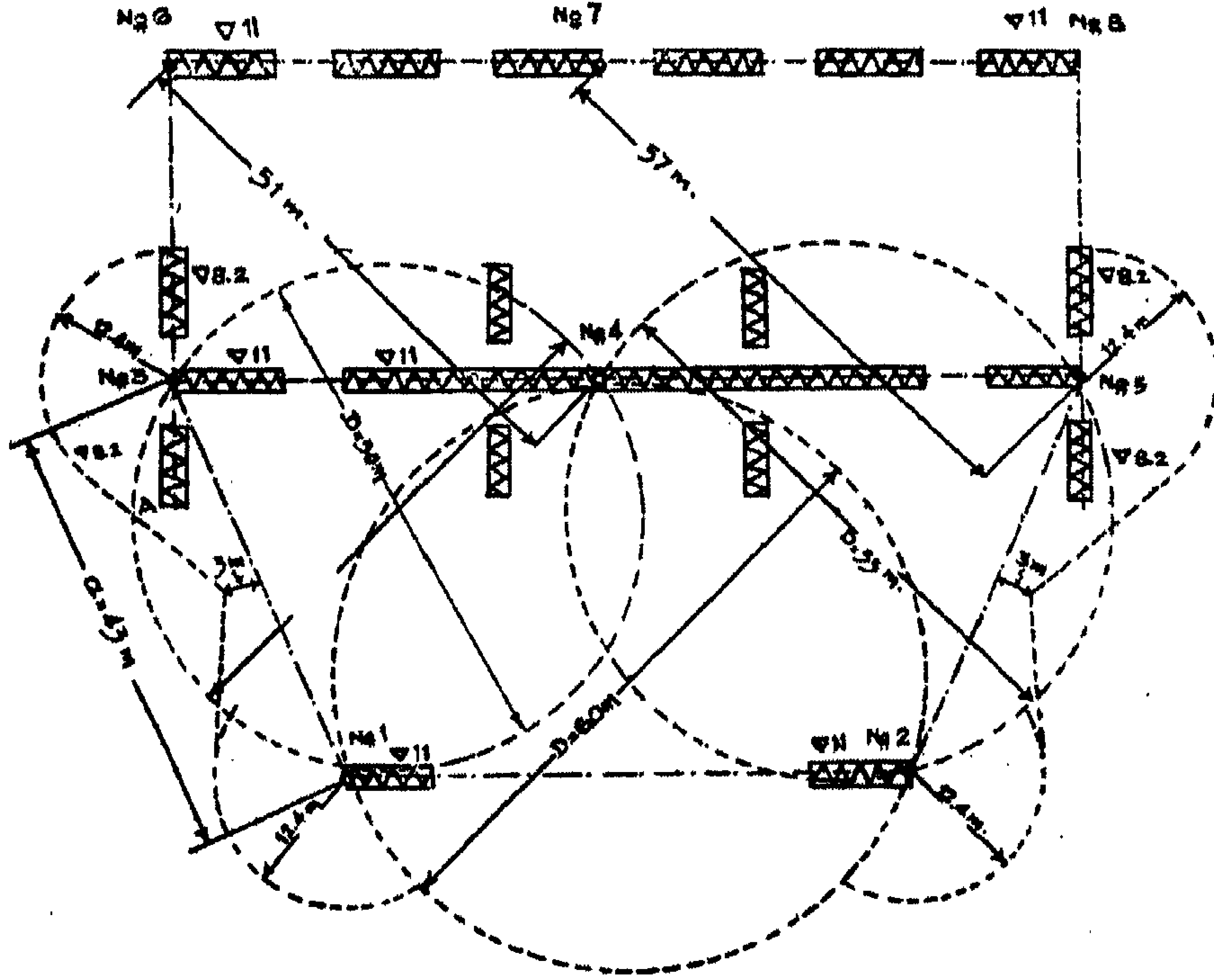
الشكل 12.20: المساحة عند ارتفاع h_x المحمية بثلاث سواري صواعق ارتفاعها h (1، 2، 3)



الشكل 12.21: المساحة عند ارتفاع h_x المحمية بأربعة سواري صواعق مقامة عند أركان مستطيل

يوضح الشكل 12.22 محطة توزيع خارجية 110 kV محمية من ضربات الصواعق المباشرة. على أساس محاولة حساب أماكن إقامة سواري الصواعق على منشأ إطاري قنطري gantry

ارتفاعه 11 m تم اختيارها. بعد ذلك تم حساب المناطق الوقائية المتكونة بواسطة كل مجموعة من ثلاث أو أربع سواري.



الشكل 12.22: حماية محطة فرعية 110 kV بواسطة سواري صواعق

وسوف نفحص المنطقة الواقية لسواري الصواعق 1، 3، 4. قطر الدائرة المارة خلال قمم هذه السواري يكون $D = 50$ m. شرط الحماية الكاملة لمساحة المثلث المتكون بواسطة أعمدة الصواعق 1، 3، 4 يكون:

$$D \le 8h_a$$

وبالتالي، فإن الارتفاع الفعال h_a لهذه السواري يجب أن يكون:

$$h_a = \frac{50}{8} = 6.3 \text{ m}$$

أدنى ارتفاع فعال للسواري 1، 2، 4 لحماية مساحة المثلث المتكون من هذه السواري يكون:

$$h_a = 7.5 \text{ m}$$

أدنى ارتفاع فعال للسواري 2، 4، 5 يكون:

$$h_a = \frac{55}{8} = 6.9 \text{ m}$$

ولحماية مساحة المستطيل المكون عند أركان السواري 3، 4، 6، 7 يكون الارتفاع الفعال:

$$h_a = \frac{51}{8} = 6.4 \text{ m}$$

الارتفاع الأدنى للسواري 4، 5، 7، 8 يكون:

$$h_a = \frac{57}{8} = 7.2 \text{ m}$$

وبهذه الطريقة، من الممكن استخدام نفس الارتفاع الفعال $h_a = 7.5$ m لكل السواري. الأهداف المراد حمايتها لها أقصى ارتفاع حوالي 11 m [قضبان توزيع المحطة الفرعية]، وبالتالي فإن الارتفاع الكلي لسواري الصواعق يجب أن يكون $h = 11 + 7.5 = 18.5$ m. ولتركيب السواري، تستخدم منشآت إطارية قنطرية 11 m . المنشآت الإطارية A، B ذات الارتفاع 8.2 m تقام خارج المثلثات 1، 3، 4؛ 2، 4، 5 لذلك يكون أساسياً التحقق عما إذا كانوا يدخلون في مناطق الوقاية المتكونة بالسواري 3–1، 5–2.

نصف قطر منطقة الوقاية للسواري ذات $h = 18.5$ عند مستوى $h_x = 8.2$ حسب المعادلة (12.6) يكون:

$$r_x = 1.5 \times 18.5 \left(1 - \frac{8.2}{0.8 \times 18.5}\right) = 12.4 \text{ m}$$

أقصى ارتفاع لمنطقة الوقاية فيما بين السواري 3–1 أو 5–2 تحدد من المعادلة (12.8):

$$h_0 = 18.5 - \frac{43}{7} = 12.3 \text{ m}$$

أبعاد منطقة الوقاية فيما بين أعمدة الصواعق عند ارتفاع $h_x = 8.2$ حسب المعادلة (12.6) هي:

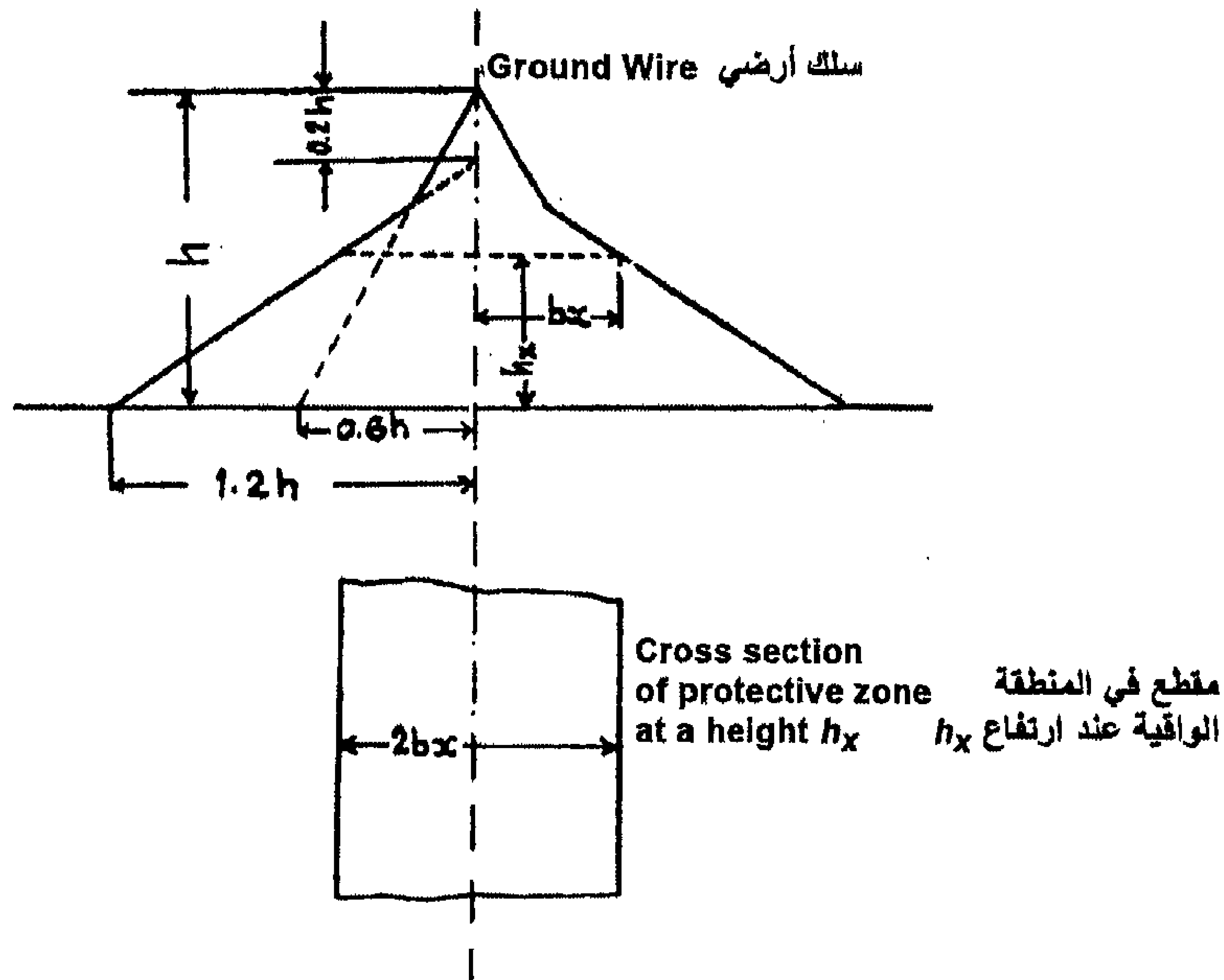
$$r_x = 1.5 \times 12.3 \left(1 - \frac{8.2}{0.8 \times 12.3}\right) = 3 \text{ m}$$

ويبين الإنشاء أن الإطارات القنطرية A، B تدخل بالكامل في مناطق الوقاية للسواري 1–3، 5–2 على الترتيب.

مناطق وقاية الأسلاك الأرضية Protective Zones of Ground Wires

منطقة حماية سلك أرضي موضحة في الشكل 12.23 مقطع منطقة الحماية على مستوى عمودي على السلك الأرضي ينشأ بنفس الطريقة كما في حالة ساري الصواعق مع فرق وحيد أن عرض المنطقة عند مستوى الأرض لسلك أرضي معلق عند ارتفاع $h \leq 30\ \text{m}$ يساوي $1.2h$. نصف عرض المنطقة الواقية b_x عند مستوى $h_x > \frac{2}{3}h$ يحسب من:

$$b_x = 0.6h\left(1-\frac{h_x}{h}\right) \tag{12.12}$$



الشكل 12.23: المنطقة الواقية لسلك أرضي

وعند مستوى $h_x > \frac{2}{3}h$ فإن نصف عرض المنطقة الواقية يكون:

$$b_x = 1.2h\left(1-\frac{h_x}{0.8h}\right) \tag{13.12}$$

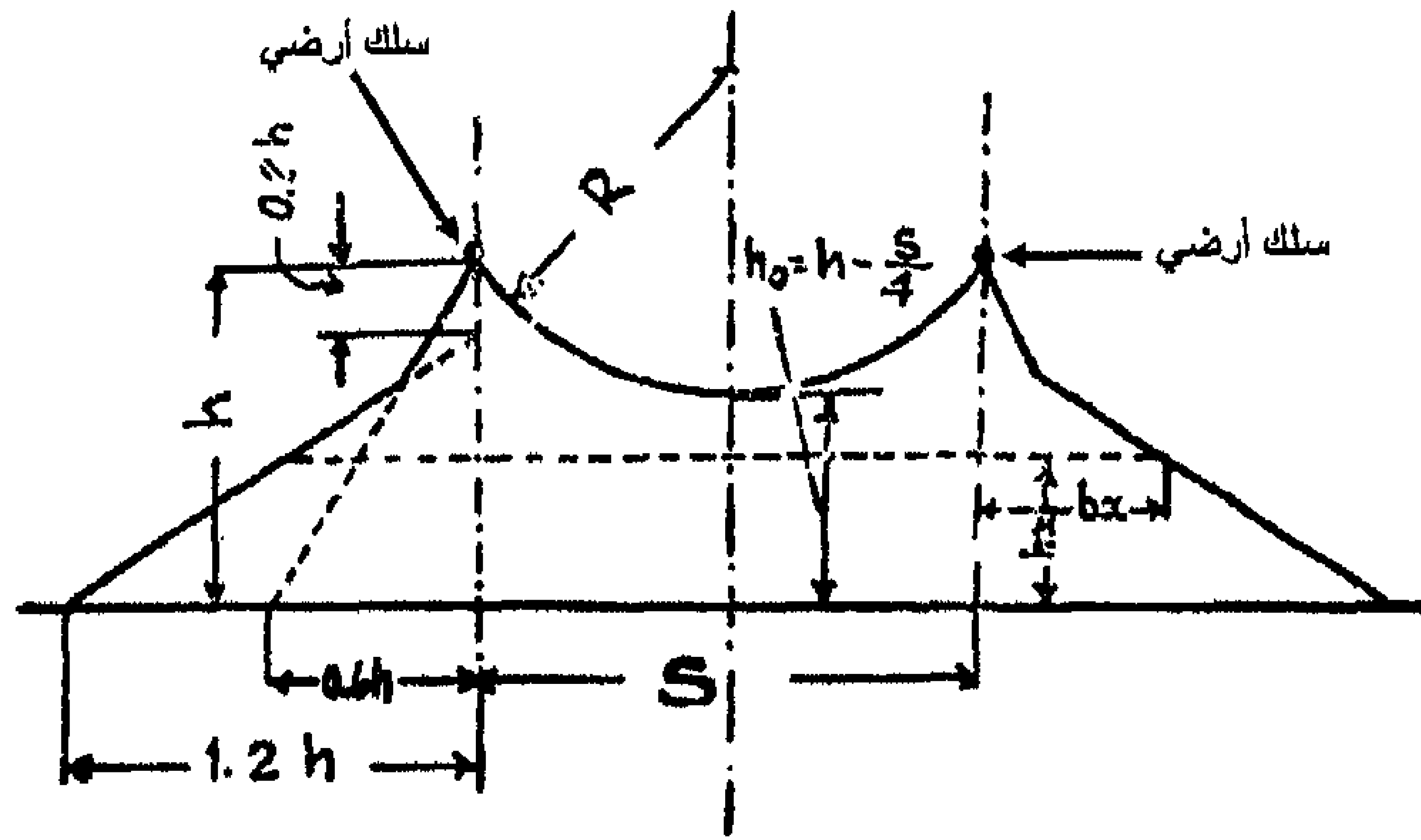
وسبق الإشارة إلى أنه في التجارب على نماذج إزاحة الإلكترود بمسافة $B = 2h$، فإن كل التفريغات تضرب السلك الأرضي. ومن الواضح، أنه إذا كان سيستخدم سلكين أرضيين كموصلات صواعق، لمسافة $S = 4h$ بينهما، فإن النقطة الموجودة على سطح الأرض في المنتصف بين السلكين الأرضيين سوف لا تضرب بالصواعق.

إذا كانت المسافة بين سلكين أرضيين $S < 4h$ فإن نقطة المنتصف بينهما عند مستوى:

$$h_0 = h - \frac{S}{4} \tag{14.12}$$

ستحمى من ضربات الصاعقة.

الجزء الخارجي للمنطقة الواقية لسلكين أرضيين يحدد بنفس الطريقة كما في حالة السلك الأرضي المفرد. الجزء الداخلي يحاط بسطح موجود في المقطع العمودي على السلك الأرضي ويعطي قوس من دائرة.



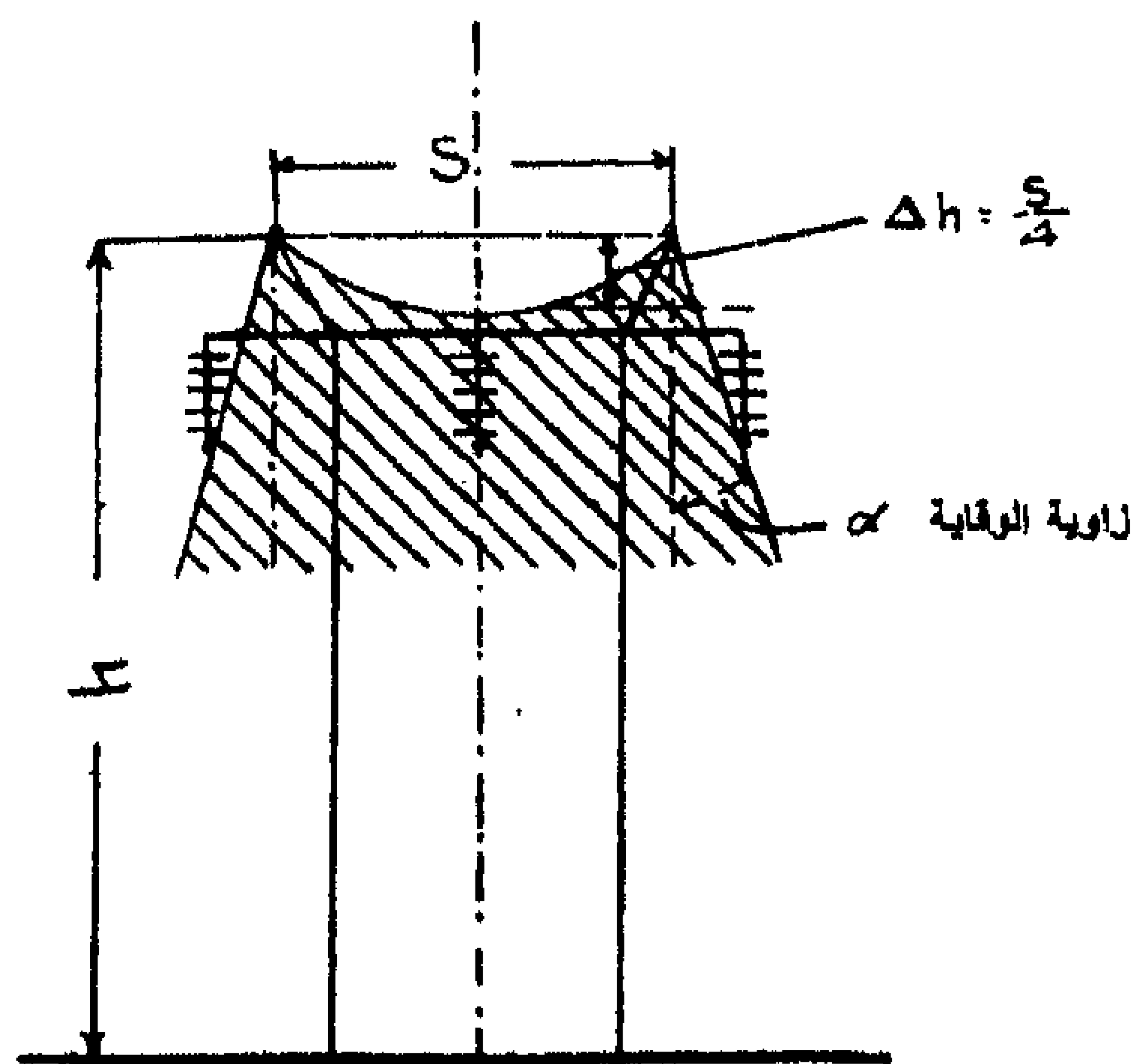
الشكل 12.24: المنطقة الواقية لسلكين أرضيين

ويمكن إنشاء هذا القوس الدائري خلال ثلاث نقط: أحدهما هو h_0 والاثنان الآخران هما الأسلاك الأرضية [الشكل 12.24].

في التركيبات الكهربية تستخدم الأسلاك الأرضية أساساً لحماية موصلات خطوط النقل. الارتفاع المتوسط لتعليق الموصلات h_x يكون أكبر من $\frac{2}{3}$ ارتفاع تعليق الأسلاك الأرضية h. عادة تكون النسبة h_x / h حوالي 0.8. بالنسبة للأسلاك الأرضية، بدلاً من مصطلح المناطق الواقية، يستخدم مصطلح "الزوايا الواقية" protective angles. زاوية وقاية سلك أرضي هي الزاوية بين خط رأسي يمر خلال سلك أرضي والخط الواصل بين الموصل والسلك الأرضي ويقع في مستوى عمودي على محور الموصل [الشكل 12.25].

في ساري صواعق مفرد ارتفاعه $h = 30\text{ m}$ مقام في منطقة شدة متوسطة من نشاط الصواعق، تحدث الضربات المباشرة نادراً جداً [مرة واحدة كل 15 سنة]. لذلك، إذا حددت منطقة واقية مع احتمال 0.1% مع عشرة موصلات صواعق على أرض محطة فرعية، فمن الممكن أن نضمن

عدم وجود أي ضربات على الهدف المراد حمايته في مدى 1500 سنة. إلى جانب ذلك، فإن الأهداف المحمية تحاط في المنطقة الواقية بهامش معين من الأمان، الذي يزيد كثيراً من الاعتمادية. إذن، بالنسبة لسواري الصواعق، فإن ضرورة تحديد الاحتمالات الصحيحة التي معها تتواجد المناطق الواقية لا تنشأ.



الشكل 12.25: زاوية الوقاية α ومناطق وقاية أسلاك أرضية على خط نقل

١٢-٥-٣ المسافات المسموحة بين الهدف المحمي وموصل الصواعق

Permissible Distances between the Object to be Protected & the Lightning Conductor

يجب أن يقع الهدف المحمي بالكامل داخل المنطقة المحمية لموصل الصواعق. وإلى جانب ذلك، يجب أن يقع عند مسافة محددة من موصلات الصواعق. إذا كانت هذه المسافة صغيرة جداً فإنه يمكن أن يحدث شرر من أجزاء موصل الصواعق للهدف المحمي أثناء ضربات الصواعق.

معدات الوقاية من الصواعق والتي تشمل، موصلات صواعق، موصلات تيار، وأجهزة تأريض يكون لها مقاومة وأيضاً محاثة inductance. يتكون جزء محسوس من المقاومة بواسطة شبكة التأريض. وتتصرف الموصلات التي تحمل تيار الصواعق إلى الأرض مثل محاثات في الاتجاه الكهربي، وتعتمد قيمتها -أولاً- على طول الموصل الحامل للتيار.

تيار الصاعقة، أثناء مروره خلال موصل صواعق، يرفع من هبوط الجهد في مقاومة التأريض ومحاثة الموصل الحامل للتيار.

بالنسبة لشكل الزاوية المائلة لجبهة تيار الصواعق يكون أقصى جهد عند نقطة موصل الصواعق، الموجود عند مسافة l من شبكة التأريض [الشكل 12.26] سيساوي:

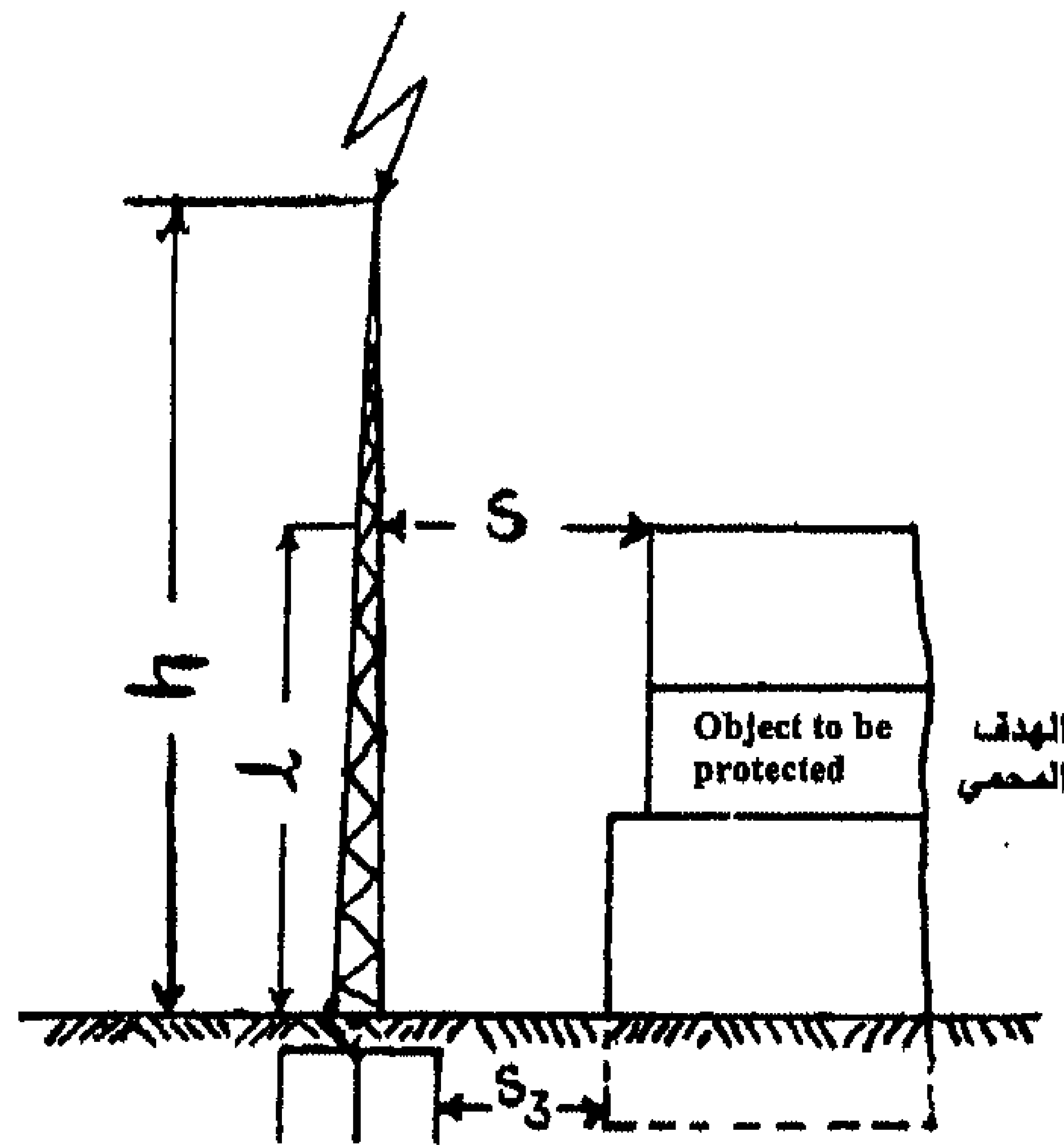
$$V_l = I_M R + L\left(\frac{di_M}{dt}\right)_{av}$$

حيث I_M = سعة تيار الصاعقة.

R = مقاومة شبكة التأريض أثناء تدفق تيار الصاعقة خلالها.

L = محاثة قطاع الموصل الحامل للتيار الذي طوله l مقاس من شبكة التأريض حتى النقطة تحت الاعتبار.

$\left(\frac{di_M}{dt}\right)_{av}$ = الانحدار [الميل] المتوسط لجبهة تيار الصاعقة.



الشكل 12.26 : لتحديد المسافة المسموحة بين ساري الصواعق والهدف المحمي

لحساب جهد موصل الصواعق، تؤخذ I_M تساوي 150 kA [احتمال 0.3%]، $\left(\frac{di_M}{dt}\right) = 30$ kA/μ sec. بالنسبة لموصلات الصواعق المعدنية، وبالمثل بالنسبة للموصلات الحاملة للتيار منفصلة التمديد، تكون المحاثة النوعية $L = 1.7$ μH/m. وبهذا الأسلوب، لشروط الحسابات لدينا:

$$V_l = 150R + 50l, \text{kV} \qquad (15.12)$$

سعات الجهد في موصل الصواعق يحدث أن تكون عالية جداً –مثلاً– بالنسبة $R_i = 10\ \Omega$ وعند مسافة $l = 10$ m من شبكة التأريض، يكون لدينا:

$$V_l = 150\times10 + 50\times10 = 2000 \text{ kV}$$

جهد شبكة تأريض موصل الصواعق أثناء ذلك يكون:

$$V_l = I_M R = 1500 \text{ kV}$$

من الواضح، أنه لكي لا يكون هناك أي شرر على الهدف المراد حمايته، فإن متانة العزل بين الهدف وموصل الصواعق يجب أن تكون أعلى من قيمة الجهد على موصل الصواعق.

وإذا كان الهدف موصل، معلق في سلسلة من العوازل والتي –مع طرفها الآخر– موصلة بذراع مستعرض، فمن الضروري تحقيق الشرط التالي:

$$V_{fl} \geq 150R + 50l \qquad (16.12)$$

حيث V_{fl}= جهد الشرر الدفعي لسلسلة العوازل.

في حالة ما إذا كان الهدف وموصل الصواعق منفصلان بثغرة هوائية طولها S يجب تحقيق الشرط التالي:

$$S \geq \frac{V_l}{E_{per}}$$

حيث E_{per}= الشدة المتوسطة المسموح بها للمجال الكهربي في ثغرات الهواء.

وبأخذ $E_{per} = 500 \text{ kV/m}$ نحصل على:

$$S \geq 0.3R_i + 0.1l \text{ m} \qquad (17.12)$$

إذا كان أساسياً منع الشرر من شبكة التأريض موصل الصواعق للهدف الموجود على الأرض، من المفروض أن تكون المسافة بينهم هي:

$$S_e \geq \frac{I_M R}{E_{per}} \qquad (18.12)$$

الشدة المتوسطة المسموحة للمجال الكهربي في الأرض هي $E_{per} \approx 300 \text{ kV/m}$. مع استخدام تيار صواعق $I_M = 150 \text{ kA}$ في الحسابات، سنحصل على الشرط:

$$S_e \geq 0.5R_i \text{ m} \qquad (19.12)$$

١٢-٦ تأريض معدات الجهد العالي الكهربية Earthing of High Voltage Electrical Apparatus

١٢-٦-١ معلومات عامة General Information

الهدف من التأريض هو الحفاظ على جهد منخفض على أي هدف. أهمية تأريض موصلات الصواعق أثناء الحماية من ضربات الصاعقة المباشرة وتأريض الأهداف الأخرى [أبراج خطوط

النقل، مصائد الصواعق، ...إلخ] في أنظمة الحماية من الصواعق تكون كبيرة جداً. كل هذه التأريضات تهدف إلى التوصيل الآمن لتيارات الصواعق إلى الأرض وتسمى "تأريضات الوقاية من الصواعق". في الأجهزة الكهربية عالية الجهد يستخد أيضاً التأريض المتعادل والتأريض للأمان. وبالرغم من أن هذين النوعين من التأريض ليس لهما أي علاقة بهذا الكتاب، إلا أننا سنناقشهما باختصار، حيث أحياناً يمكن لنوع منهما أن يؤدي عدة وظائف آنياً.

الغرض من التأريض المتعادل [تأريض التشغيل] هو ضمان تشغيل عادي للمعدة. تأريض التعادلات لمحولات القدرة، محولات جهد القياس، تأريض المفاعلات لتعويض التوازي في خطوط النقل الطويلة، ...إلخ تنتمي إلى هذه الفئة.

ينفذ تأريض الأمان بغرض جعل تشغيل الجهاز الكهربي آمناً وذلك بتأريض الأجزاء المعدنية للجهاز والتي يمكن أن تكون تحت جهد أثناء دوائر القصر [هيكل آلة، خزان محول، ...إلخ].

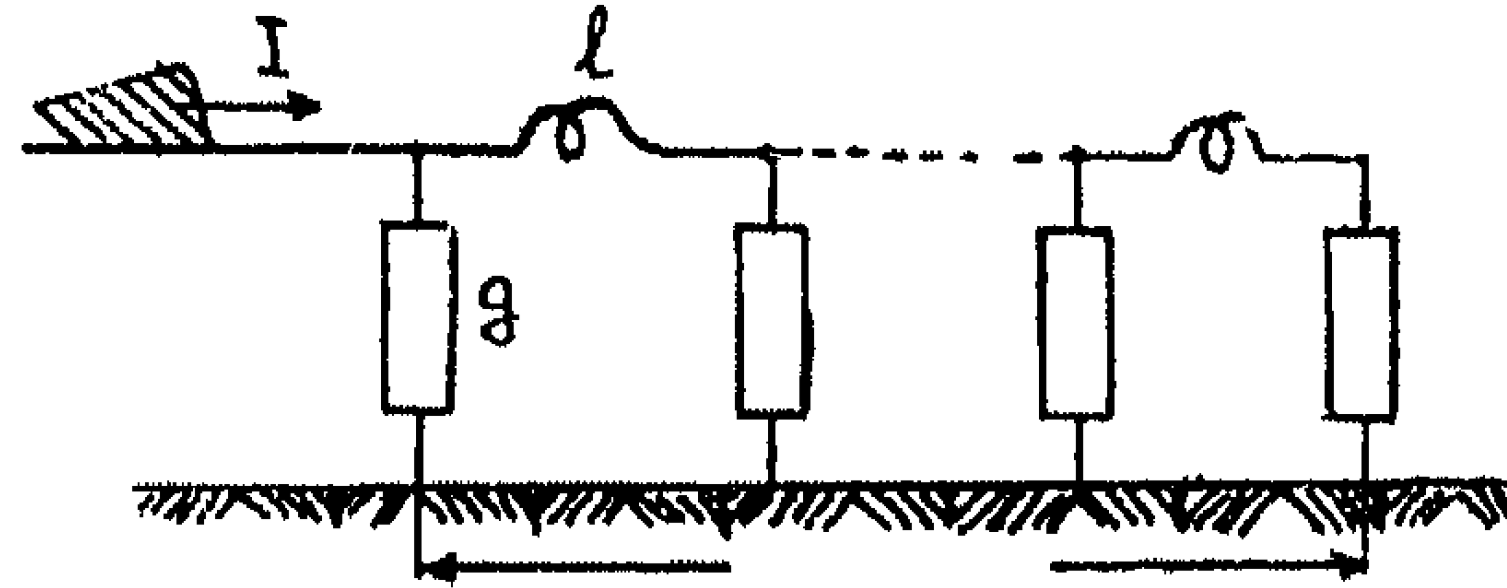
ولتنفيذ أي نوع من التأريض يكون مطلوب أجهزة تأريض. تتكون من إلكترودات تأريض مدفونة في الأرض وأسلاك تأريض تصل العناصر المراد تأريضها بالإلكترودات التأريض. جهد الهدف المراد تأريضه يحدد بمجموع هبوطات الجهد في سلك التأريض وإلكترودات التأريض. عند تردد القدرة، فإن المكون الأول لجهد الهدف يكون صغيراً لدرجة الإهمال، وعند الجهد الدفعي يمكن أن يكون له قيمة ملحوظة، ولكن يفضل اعتباره منفصلاً. لذلك، سندرس فقط هبوط الجهد في إلكترودات التأريض.

وتسمى شبكة التأريض بقيمة مقاومتها والتي تحدد بنسبة هبوط الجهد في شبكة التأريض إلى التيار المار خلالها. وتحدد مقاومة شبكات التأريض بواسطة أبعادها وخصائص التربة الموجودة بها. قيمة التيار المار فيها ومعدل تغير التيار يمكن أن يكون له تأثير كبير على قيمة المقاومة.

وتستخدم الأعمدة الرأسية وأيضاً الشرائح [الخُوَصْ] الأفقية ذات الأطوال الكبيرة [عشرات الأمتار] كإلكترودات لنظام التأريض. بالنسبة للإلكترودات الطويلة، يمكن تحليل تأثير محاثتها بمساعدة دوائر مكافئة -تتكون في الحالة العامة- من محاثة الإلكترود L، مقاومتها الفعالة r، المواصلة g conductance، والسعة C capacitance، وتبدأ التأثير على هبوط الجهد. المقاومة الفعالة لإلكترود تأريض تكون في كل الحالات، 1.2 رتبة أقل من معاوقتها their impedance، لذلك فهي لا تلعب دوراً هاماً. السعة C هي سعة الإلكترودات بالنسبة

لمستوى الجهد صفر، ويزداد تأثيرها مع زيادة المقاومة النوعية للتربة. وبالإضافة إلى ذلك، بالنسبة لأنواع التربة التي لها مقاومة نوعية $\rho < 5\times10^3\ \Omega\cdot m$ فإن التيار السعوي حتى مع النبضات يكون صغيراً لدرجة الإهمال مقارنة مع تيارات التوصيل. لذلك، في معظم الحالات، فإن الدائرة المكافئة لإلكترود تأريض [الشكل 12.27] يتكون من المحاثة inductance لكل وحدة طول L والمواصلة لكل وحدة طول g التي تكون مرتبطة بمقاومة إلكترود التأريض بالعلاقة البسيطة:

$$g = \frac{1}{R\,l}$$



الشكل 12.27: الدائرة المكافئة لإلكترود تأريض مدفون في تربة لها مقاومة نوعية $\rho \leq 5\times10^3\ \Omega.m$

عند اللحظة الأولى من الزمن بعد توصيل مصدر التيار لإلكترود التأريض، تقاوم محاثته اختراق التيار المقاطع البعيدة لإلكترود التأريض. والذي بهذا السلوك يأخذ جزء صغير من التيار ويحمله بعيداً إلى الأرض. تدريجياً يصبح توزيع الجهد بطول إلكترود التأريض منتظماً وتنخفض معاوقة إلكترود التأريض وتقترب من قيمتها المحددة R.

فترة دوام الظاهرة العابرة في إلكترود التأريض تعتمد على ثابت زمني T حيث:

$$T \equiv L\,g\,l^2 \qquad (20.12)$$

وهو يتناسب مع محاثة إلكترود التأريض الكامل $L\,l$ وموصليته $g\,l = \frac{1}{R}$.

في ترتيبات التأريض الخاصة بالحماية من الصواعق، قيمة معاوقة نظام التأريض عند لحظة أقصى تيار صاعقة، أي عند زمن $t = \tau_f$ يكون ذات أهمية كبيرة. فإذا كان $\tau_f > T$ فإنه في اتجاه لحظة الزمن المطلوبة لنا ستكون الظاهرة العابرة في نظام التأريض زائدة وسيكون للنظام مقاومة تأريض R لنظام ساكن. نظام التأريض الذي حقق هذا الشرط يسمى "مُجَمّع" lumped. وعلى العكس إذا كانت τ_f مقارنة مع T، فإنه عند لحظة أقصى تيار فإن المعاوقة تكون أكبر من المقاومة $Z > R$. نظام التأريض هذا يكون نظام طويل. وبهذا الأسلوب يصبح

عملياً أن نسمي نظام التأريض -الذي لا تلعب فيه المحاثة دوراً هاماً- مُجَمْع بينما في نظام التأريض الطويل تسبب المحاثة زيادة في معاوقة نظام التأريض. وعند تردد القدرة، تكون كل أنظمة التأريض مجمعة.

يرجع تأثير سعة التيار المار من نظام التأريض لحقيقة أنه مع زيادة هذا التيار، فإن جهد نظام التأريض:

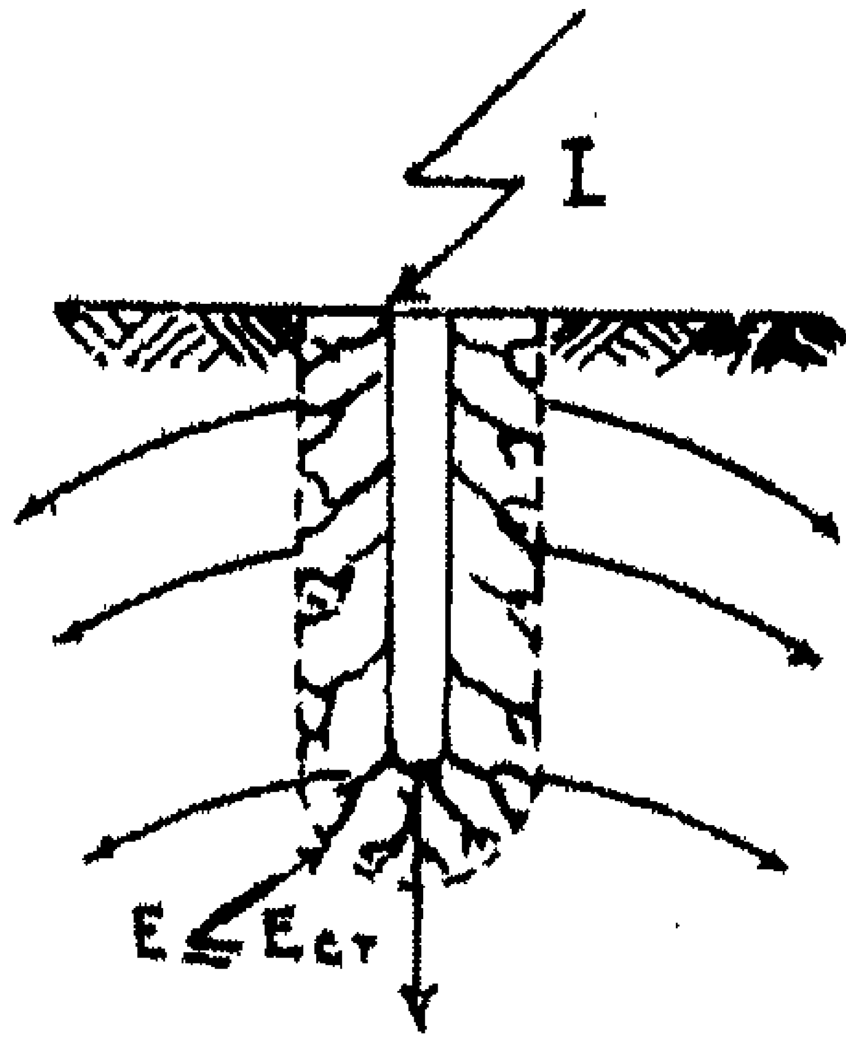
$$V = IR$$

وشدة المجال في التربة:

$$E = iP$$

حيث i = كثافة التيار.

عندما تصل شدة المجال قيمة محددة، تحدث عمليات فيزيائية-كيمائية معقدة في التربة، ونتيجة لها تنخفض المقاومة النوعية للتربة. مع المزيد من الزيادة في التيار، تصل شدة المجال إلى قيمة حرجة يحدث عندها الانهيار الكهربي للتربة، وينشأ الانهيار على هيئة قنوات موصلة متفرعة. هذه القنوات تتفرع إلى قطاعات من الأرض في الجوار المباشر للإلكترود، أبعادها كما لو كانت متزايدة [الشكل 12.28]. ونتيجة لذلك، تنخفض مقاومة نظام التأريض، ومع كبر الانخفاض، تكبر أبعاد منطقة القوس -أي- يكبر التيار المار من نظام التأريض. هذه العملية تبدأ في لعب دوراً هاماً عند التيارات الكبيرة جداً التي يمكن أن تمر أثناء تفريغ الصاعقة.



الشكل 12.28: منطقة القوس حول إلكترود التأريض عندما يمر تيار كبير مبتعداً عنه إلى الأرض

في توافق مع الاعتبارات السابقة، من المعتاد تمييز "المقاومة الساكنة" لخصائص نظام تأريض عن تأريض التشغيل والأمان عندما تكون محاثة إلكترودات التأريض وعملية تكون القوس في التربة ليس لها أهمية، ومعاوقة الدفع [تمور] لنظام التأريض مميزة لنظام تأريض الوقاية من الصواعق، قيمة هذه المعاوقة تحدد بصفة دفع التيار مثل عملية تكون القوس في التربة.

نسبة معاوقة الدفع [النبض] لنظام تأريض إلى مقاومته الساكنة هي:

$$\alpha_i = \frac{Z_i}{R}$$

وهي تسمى "معامل الدفع". بالنسبة لنظام التأريض المجمع، والذي يكون له أهمية أساسية فيه انهيار التربة تحت فعل تيار الصواعق الكبير تكون $\alpha_i < 1$. بالنسبة لأنظمة التأريض الطويل α_i يمكن أن تكون أكبر وأيضاً أصغر من الوحدة.

١٢-٦-٢ القيمة المسموحة لمقاومات أنظمة التأريض

Permissible Value of Resistances of Earthing Arrangements

كلما صغرت قيمة مقاومة أي نظام تأريض تؤدي الوظائف أفضل بواسطة كل أنواع أنظمة التأريض كما سبق. ومع ذلك، مع تخفيض المعاوقة لنظام تأريض، فإن تكلفته تزداد، من هنا فإن القيم المسموحة لمعاوقة نظام تأريض يجب أن تثبت. لتأريض التشغيل تُحدد القيمة المسموحة لمعاوقة نظام تأريض بمطالب نظام التشغيل لكل تركيب خرسانة ولن يعتبر هنا. القيم المسموحة لنظم التأريض للوقاية من الصواعق تقع في مدى Ω (30–5).

افترض أن محول –خزانه موصل بإلكترود تأريض ذو شكل نصف كروي وموضوع على أرض محطة فرعية [الشكل 12.29] وحدث شرر لأحد جلب هذا المحول. تيار دائرة القصر للأرض I، والذي سينتج هبوط جهد $V = IR$، حيث R هي مقاومته، سيمر خلال العطل. ليس من الصعب إيجاد قيمة R لإلكترود التأريض النصف كروي، حيث إن تشكل المجال الكهربي في الأرض يكون بسيطاً جداً [الشكل 12.29].

مقاومة طبقة أولية من الأرض بين الأسطح متساوية الجهد [كرات] ذات أنصاف الأقطار r، $r + dr$ هي:

$$dR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2}$$

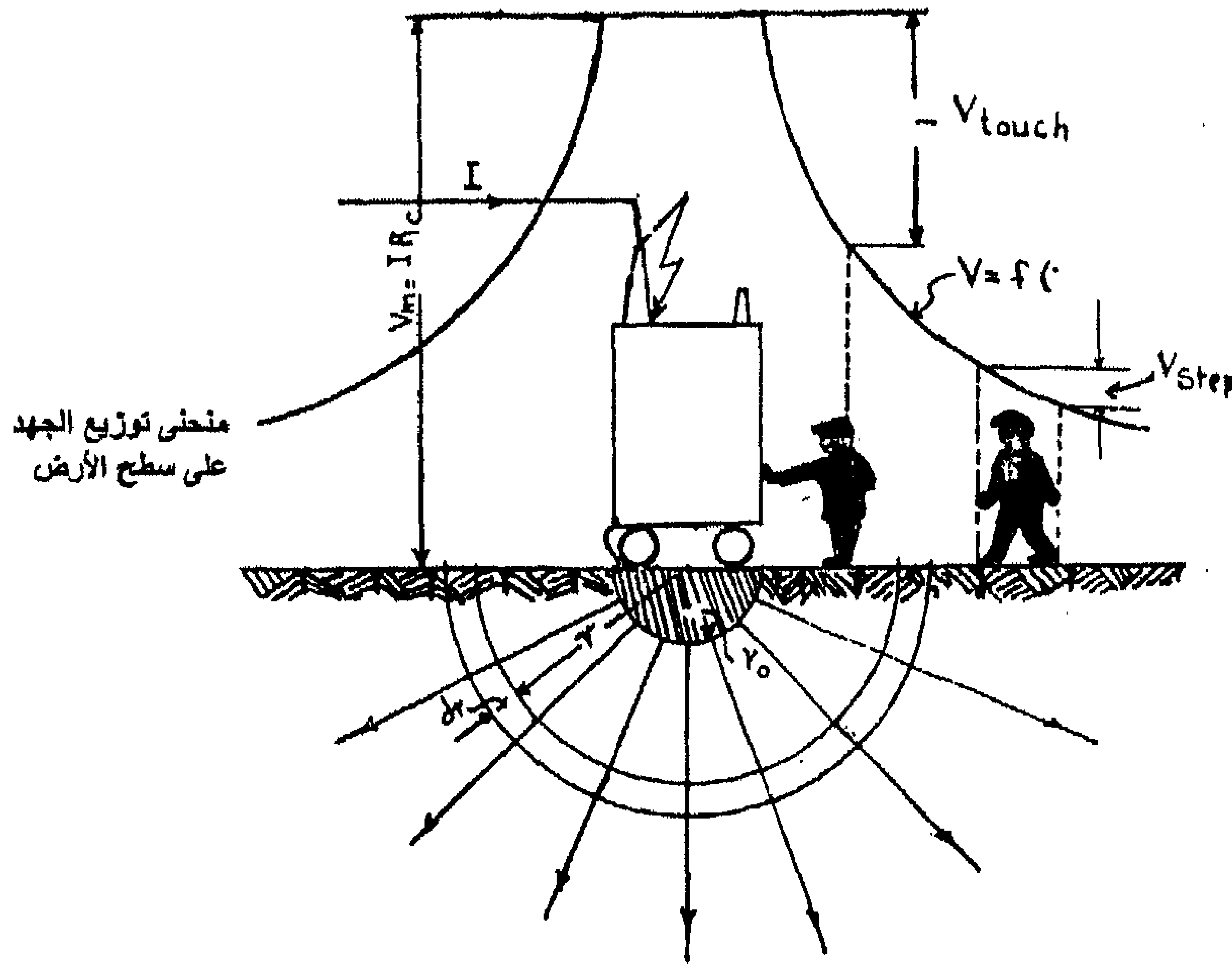
وبالتالي، فإن المقاومة الساكنة لتأريض الإلكترود النصف كروي ذات نصف القطر r_0 ستكون:

$$R = \int_{r_0}^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi r_0} \qquad (21.12)$$

أثناء تدفق التيار I من الإلكترود فإن إلكترود نظام التأريض سيكون له بالتأكيد جهد متزايد، ولكن القطاعات المجاورة من سطح الأرض سيكون لها أيضاً جهد متزايد. جهد نقط

سطح الأرض الموجودة عند مسافة r من مركز نظام التأريض تكون مساوية للآتي:

$$V_r = I \int_r^{\infty} dR = I \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \tag{22.12}$$



الشكل 12.29: لتحديد جهود اللمس والخطوة

منحنى توزيع الجهد على سطح الأرض معطى أيضاً في الشكل 12.29. عند زمن دائرة القصر، يمكن أن يكون إنسان في منطقة الجهد الزائد. إذا لمس أثناء ذلك خزان المحول -فإن جهد- يساوي فرق الجهد بين الخزان والأرض في مكان وضع قدم الإنسان -يسمى "جهد اللمس" V_{tch} - يمكن أن يؤثر عليه. الإنسان المتجه نحو المحول يتعرض لـ"جهد خطوة" V_s حيث $V_s < V_{tch}$ وذلك يتوقف على طول الخطوة [متوسط 80 cm] والمسافة من الإنسان حتى نظام التأريض [الشكل 12.29].

ولأمان الأشخاص العاملين، من الضروري تصميم نظام تأريض المحطة الفرعية بحيث تكون جهود اللمس والخطوة لا تتعدى بأي حال القيم المسموحة. في الوقت الراهن فإن بيانات تحديد الجهود -من وجهة نظر الأمان- المؤثرة على الإنسان غير معروفة، حيث إن هذه الجهود تعتمد على عدد كبير من العوامل. ومن بين هذه العوامل فترة دوام تأثير الجهد والتي تلعب دوراً هاماً، فمع انخفاضها يزداد الجهد المقاوم بواسطة الإنسان. هذه الحقيقة فرضت مطالب أكثر

سهولة على تأريض الأمان في التركيبات ذات تيارات دائرة القصر الكبيرة مع الأرض $(I > 500\ A)$ ، والتي فيها لا تكون فترة دوام دائرة القصر كبيرة وتحدد بواسطة زمن فعل مراحل الحماية. مع زمن دوام صغير لدوائر القصر مع الأرض فإن احتمال سقوط إنسان في منطقة الجهود المتزايدة عند زمن العطل تنخفض كثيراً جداً.

طبقاً لقواعد تركيب الإجهزة الكهربية في الاتحاد السوفيتي فإن:

١. في التركيبات مع تعادل مؤرضٌ مصمت فإن نظام التأريض يجب أن تكون له مقاومة:

$$R \le 0.5\ \Omega \qquad (23.12)$$

٢. في التركيبات مع تعادل معزول فإن نظام التأريض يجب أن تكون له مقاومة:

$$R \le \frac{250}{I}\ \Omega \qquad (24.12)$$

إذا استخدم فقط لتركيبات جهد عالي، و

$$R \le \frac{125}{I}\ \Omega \qquad (25.12)$$

إذا استخدم لتركيبات جهد منخفض، ولكن ليس أكبر من $10\ \Omega$.

في التركيبات التي بدون جهاز تعويض –مثل ملف بترسون– يحدث أن التيار المحسوب I يكون تيار سعوي لدائرة قصر مع أرضي لخطوط علوية وكابلات كاملة التوصيل كهربياً:

$$I = 3V_{ph}\,\omega C$$

حيث $C =$ سعة طور واحد من التركيبة للأرض.

في التركيبات مع تعويض، يحدث أن التيار المحسوب يكون متخلف residual أو غير معوض لدائرة قصر من الأرض، والذي يمكن أن يحدث في الدائرة المعطاة أثناء هذا الزمن إذا كان جهاز التعويض خارج الدائرة ولكن ليس أقل من 30 A .

التيار المحسوب لنظام التأريض الموصل به جهاز تعويض، يساوي 125% من التيار الاسمي nominal لهذا الجهاز.

في كل هذه الحالات –يفترض أن– بعيداً عن التخفيض في مقاومة التأريض حتى الحدود السابقة أعلاه، فإن كل الإجراءات لتساوي توزيع الجهد عبر سطح الأرض في أرض المحطة الفرعية قد اتخذت.

١٢-٦-٣ الخواص الكهربية الرئيسية للتربة Main Electrical Characteristics of Soil

الموصلية الكهربية للتربة Electrical Conductivity of Soil

التربة التي يحدث فيها خروج التيار من نظام التأريض، معقدة جداً وغير متجانسة في التكوين والتركيب. الأجزاء الرئيسية المكونة للتربة هي جسيمات صلبة من أصل عضوي أو غير عضوي والماء. الموصلية الكهربية للمكونات الصلبة للتربة في الظروف الجافة تكون مهملة، ويمتلك الماء النقي كيميائياً مقاومة نوعية عالية جداً. ومع ذلك، تحتوي التربة على أملاح مختلفة وقلويات تكون في وجود الرطوبة إلكتروليتات تحدد بمفردها الموصلية الكهربية للتربة. وبهذه الطريقة تعتمد المقاومة النوعية للتربة كثيراً على تركيبها الكيميائي ومحتوى الرطوبة.

ولا تعتمد سعة احتجاز الرطوبة في التربة فقط على كمية الرطوبة المعلقة وقرب مياه التربة السفلية بل أيضاً على تركيب التربة. كلما صغرت ابعاد جسيمات التربة، كبرت كمية الماء المحتجزة بالتربة، أي زادت سعة احتجاز الرطوبة لها.

وتختلف أنواع التربة المكونة من الرمل والطمي كثيراً عن بعضها البعض في التكوين والتركيب. الرمل والطمي [الطين] هي نواتج الفعل العاصف للرياح على المساحات الواسعة من التلال والجبال. التربة كثيرة التلال الواسعة تكون أساساً من أصل عضوي.

يتكون الرمل من بللورات نصف شفافة من الكوارتز يتراوح قطرها بين mm (2–0.2)، ولها تركيب مسامي، فقيرة في الإلكتروليت وتمتلك إمكانية ضعيفة جداً في احتجاز الرطوبة. الطين له تركيب غراواني مع تخزين مكثف من الجسيمات التي لها أبعاد آلاف من كسور الملليمتر، وهو غني في الإلكتروليتات وله قدرة أكبر على احتجاز الرطوبة من الرمال. تربة الغرين بالمثل لها تركيب غرواني، سعة احتجاز كبيرة للرطوبة وغنية جداً في الإلكتروليتات. وبعكس الطين، فإن الغرين له تركيب قابل للتفتت.

مع ترطيب الرمل الجاف جداً فإن مقاومته التي نبدأ بها تنخفض كثيراً جداً، وبعد ذلك بالتناسب مع ملء مساحات التربة بالماء، يقترب من مقاومة الماء. ترطيب الطين والغرين يؤدي إلى تكون إلكتروليتات، من هنا فإن مقاومة هاتين التربتين يمكن أن تكون أصغر من المقاومة النوعية الماء المرطب لهم. بسبب حقيقة أن الطين والغرين لهما سعة احتجاز رطوبة أكبر من الرمل، فإن مقاومتهما النوعية تكون دائماً أقل لنفس الظروف الجوية.

القيم النموذجية للمقاومة النوعية لعدد من أنواع التربة في الظروف الطبيعية معطاة في الجدول 12.1.

الجدول 12.1

التربة	المقاومة النوعية (Ω.m)
الرمل	400 وأكثر
تربة رملية	300
تربة طفلية	100
طين	60
تربة قطن أسود	50
خُث Peat	20
ماء نهر	10–50

وعلى مدار السنة فيما يتعلق مع الظروف الجوية، درجة حرارة التربة، محتوى الرطوبة والظروف الفيزيائية في التربة، تشبع الطبقات المختلفة لها، كل ذلك يخضع لتغيرات. لذلك، تتذبذب المقاومة النوعية للتربة خلال آماد واسعة. في الشتاء وفي اتجاه نهاية الصيف الجاف تزداد مقاومة التربة.

تصميم أنظمة التأريض تعتمد على نتائج القياسات المباشرة للمقاومة النوعية لأنواع التربة، وتتم هذه القياسات عامة أثناء الفترة الدافئة من السنة.

وحيث إنه عند زمن تصميم نظام تأريض، من الضروري أن نسترشد بأعلى قيمة ممكنة من ρ للعوّل، فإن القيمة المقاسة من ρ مضروبة في معامل التغيرات الفصلية K، الذي يؤخذ من الجدول 12.2، تؤخذ كقيمة للحسابات.

الجدول 12.2

نوع التأريض	نوع إلكترود التأريض	عمق التمديد (m)	معامل التغيرات الفصلية [فصول السنة] K
تأريض تشغيل ووقاية	أفقي	0.5	4.5–6.5
		0.8	1.6–3
تأريض للوقاية من الصواعق	رأسي	0.8	1.4–2
	أفقي	0.5	1.4–1.8
	رأسي	0.8	1.2–1.4

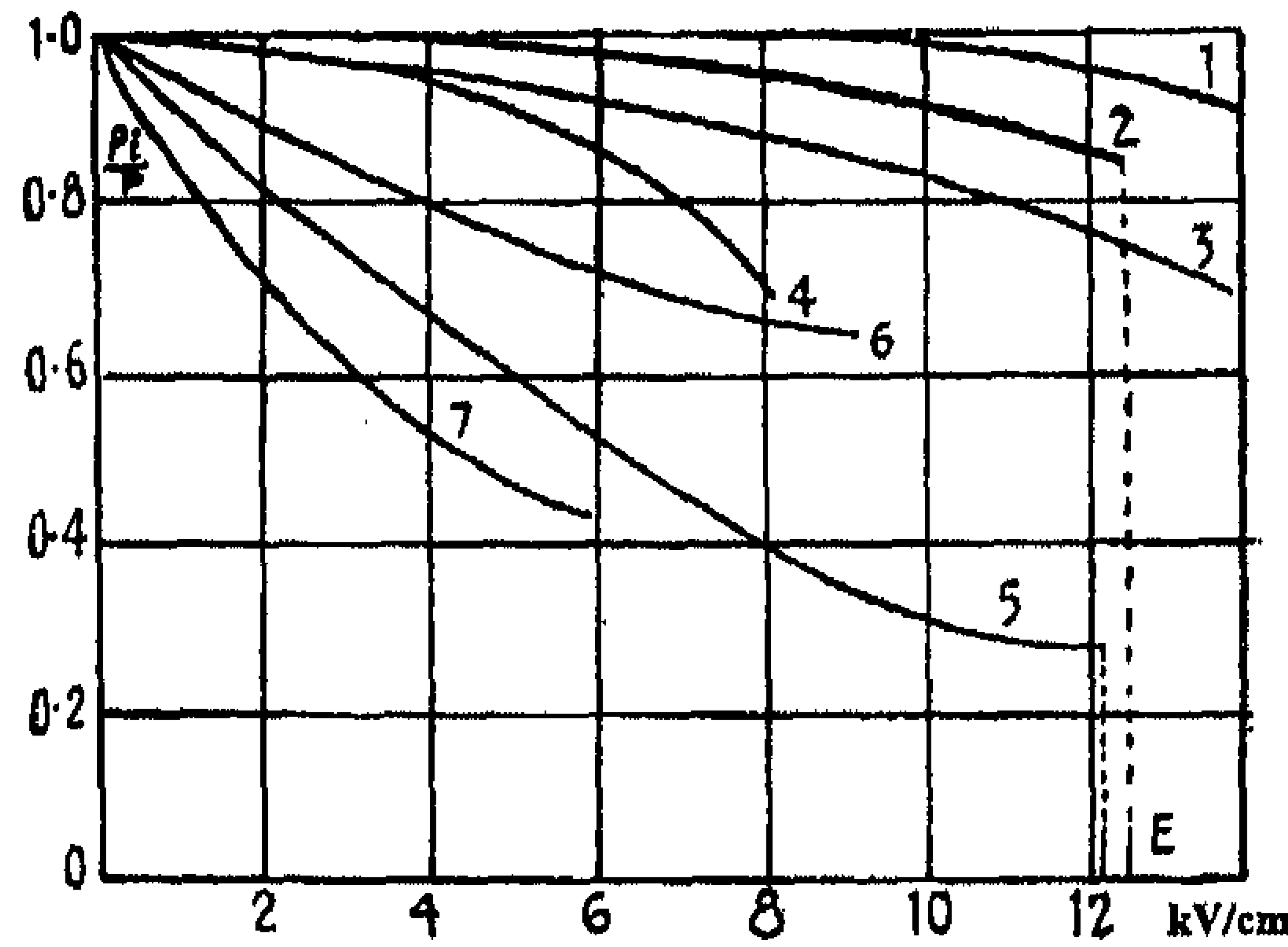
كما هو مبين في الجدول 12.2، بالنسبة لتأريض التشغيل والحماية، تؤخذ معاملات فصلية [مرتبطة بفصول السنة] كبيرة، حيث إنها تعمل طوال السنة حول زيادة محسوسة في ρ في الشتاء بالنظر إلى الأخذ في الاعتبار تجمد التربة.

قيمة المقاومة النوعية المقاسة لتربة تضرب في قيمة أعلى من المعامل K ، إذا تم القياس عندما كانت التربة رطبة ، بعد هبوط كمية كبيرة من الرواسب.

الخصائص الدفعية [النبضية] للتربة Impulse Characteristics of Soil

لحساب معاوقة تمور نظام تأريض للوقاية من الصواعق، فمن الضروري معرفة ليس فقط المقاومة النوعية للتربة بل أيضاً خواصها الدفعية، أي اعتماد مقاومتها النوعية على شدة المجال الكهربي وقيمة شدة الانهيار للتربة.

وطبقاً للأبحاث في مجال منتظم، فإن كل أنواع التربة تخفض مقاومتها النوعية مع الزيادة في شدة المجال حتى قيمة الانهيار. وكلما زادت فترة تأثير الدفع زاد مدى هذا الخفض.



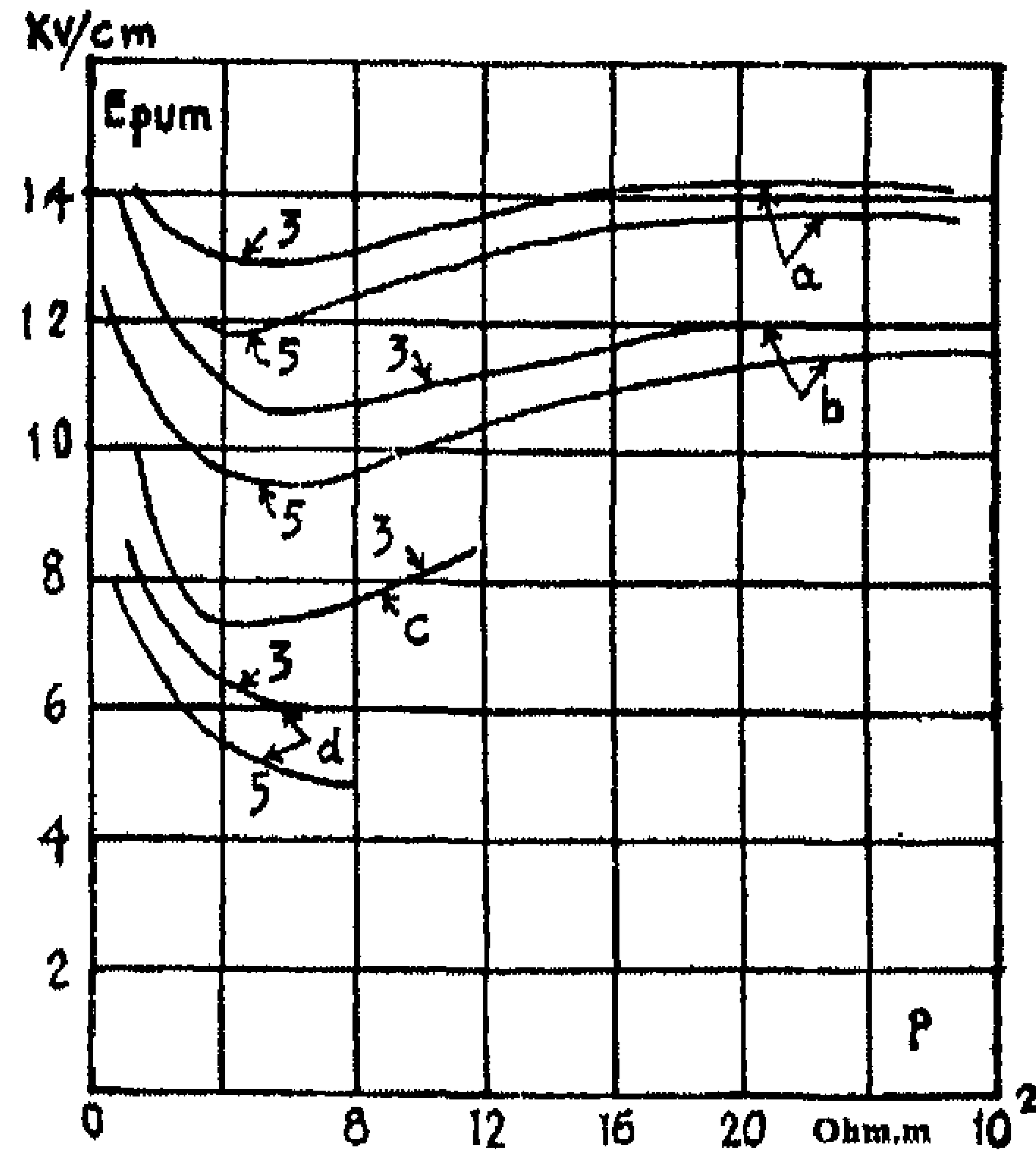
الشكل 12.30 : اعتماد ρ_i/ρ على شدة المجال الكهربي لترب مختلفة لجبهة موجة $\tau_f \approx (2–3)\ \mu$ sec. (1) ماء حنفية $\rho = 70\ \Omega$.m ؛ (2) رمل $\rho = 450\ \Omega$.m ؛ (3) رمل $\rho = 3000\ \Omega$.m ؛ (4) طين $\rho = 70\ \Omega$.m ؛ (5) طين $\rho = 3000\ \Omega$.m ؛ (6) غرين $\rho = 100\ \Omega$.m ؛ (7) غرين $\rho = 3000\ \Omega$.m

منحنيات الانخفاض النسبي للمقاومة النوعية للتربة والماء الرطب لها وشدة المجال $\rho_i/\rho = f(E)$ للحظة أقصى موجة معطى في الشكل 12.30.

من هذه المنحنيات، نرى أن صفة اعتماد $\rho_i/\rho = f(E)$ يتحدد بطبيعة التربة ورطوبتها، أي بقيمة مقاومتها النوعية.

شدات الانهيار لعينات مختلفة من التربة أثناء الانهيار على جبهة موجة مع أزمنة مختلفة τ قبل التفريغ معطاة في الشكل 12.31. وكما نرى من المنحنيات، فإن انخفاض المقاومة النوعية للتربة تسبب زيادة حادة في شدة انهيارها وتكون مرتبطة بترطيب محسوس

بالماء الذي له متانة كهربية دفعية كبيرة مقارنة مع التربة الجافة. في التربة الجافة، يحدث الانهيار في مسام التربة، أي في فجوات الهواء، وكعاقبة لذلك فإن الفرق في الطبيعة الفيزيائية- الكيميائية لأنواع التربة له تأثير طفيف وشدات التفريغ للتربة الجافة تكون ثابتة تقريباً.



الشكل 12.31: شدات التثقب للتربة لأزمنة ما قبل التفريغ μ sec. (3–5). (a) رمل؛ (b) طين أصفر؛ (c) غرين؛ (d) طين أحمر. الأعداد على المنحنيات تشير إلى زمن ما قبل التفريغ بالميكروثانية

١٢-٦-٤ المقاومات الاستاتيكية لأنظمة تاريض بسيطة

Static Resistances of Simple Earthing Arrangements

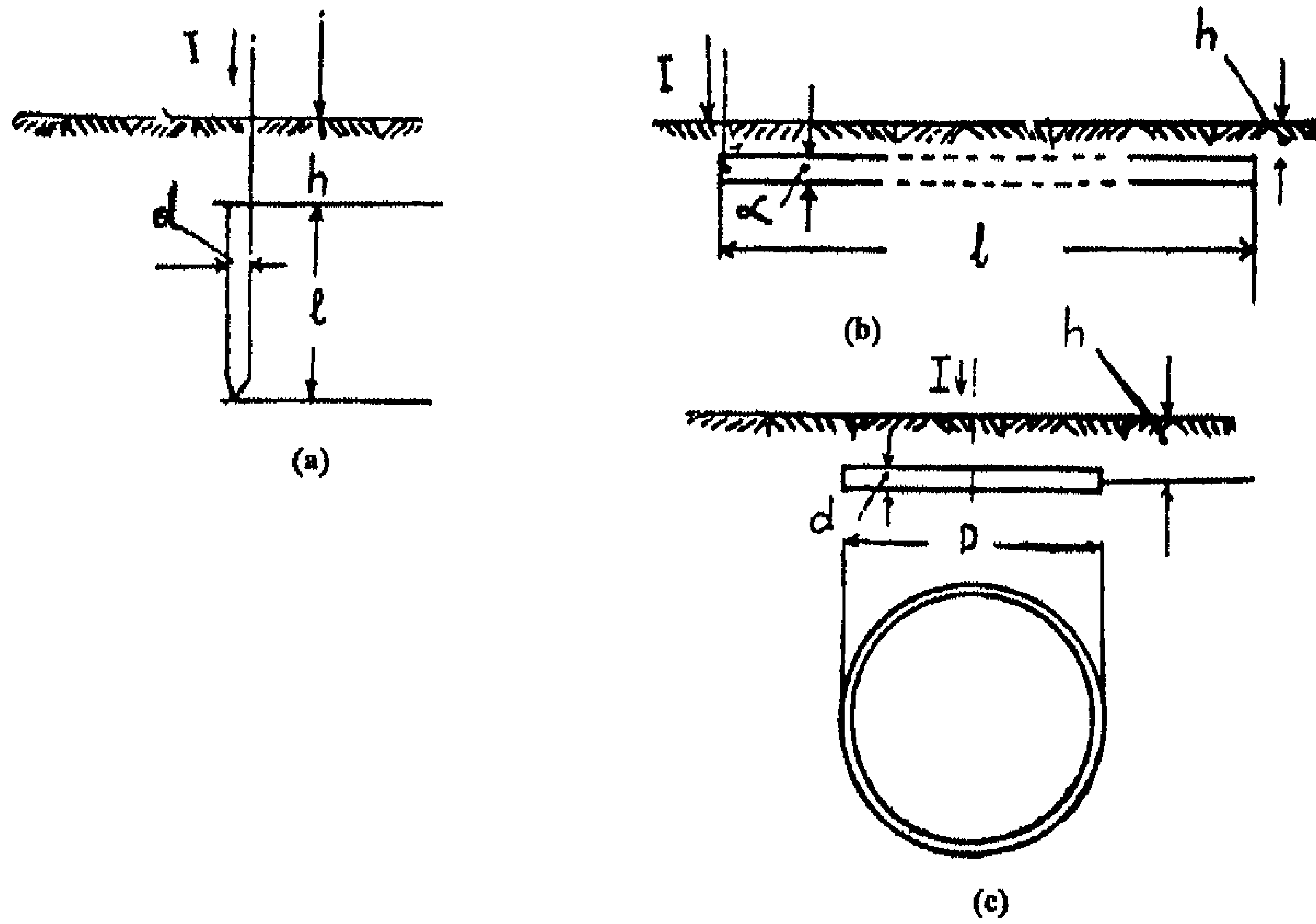
تستخدم الأعمدة الرأسية التي طولها m (2–3) [أنابيب من فولاذ الكربون قطرها m (2–6)] أو شرائح أفقية مدفونة عند عمق ليس كبيراً في حدود m (0.5–0.8) كإلكترودات لنظام تأريض.

مقاومة تأريض إلكترود رأسي عند $h \leq 1$ m [الشكل 12.32(a)] تحدد حسب المعادلة:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \tag{26.12}$$

فمثلاً بالنسبة لتربة لها مقاومة نوعية $\rho = 100\ \Omega.m$ ، $l = 300$ cm ، $d = 6$ cm تكون $R = 28\ \Omega$.

وتستخدم كأجهزة تأريض مستقلة الشرائح الأفقية ذات المقطع الدائري أو المستطيل على هيئة أشعة أو حلقات [الشكل 12.32(b) ، 12.32(c)]، وفي الغالب كعناصر موصلة لنظام تأريض معقد من أنابيب.



الشكل 12.32 : إلكترودات التأريض. (a) أنبوبي؛ (b) مسطح؛ (c) حلقي

وتحسب مقاومة التأريض لإلكترود تأريض شعاع أفقي أو حلقة حسب الصيغة الموجودة في الجدول 12.3.

الجدول 12.3 : المقاومة الاستاتيكية لإلكترودات التأريض الأفقية

نوع جهاز التأريض	عمق التمديد	المقطع المستعرض للإلكترود: دائري (قطره d)	المقطع المستعرض للإلكترود: مستطيل (عرضه b)
شعاع أفقي طوله l	h	$R=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{l^2}{hd}$	$R=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{2l^2}{hb}$
	$h=0$	$R=\frac{\rho}{\pi l}\ln\frac{2l}{d}$	$R=\frac{\rho}{\pi l}\ln\frac{4l}{b}$
دائرة أفقية قطرها D	h	$R=\frac{\rho}{2\pi^2 D}\ln\frac{4\pi D^2}{hd}$	$R=\frac{\rho}{2\pi^2 D}\ln\frac{8\pi D^2}{hb}$

بالنسبة لتأريض شريحة الحديد المسطحة الأفقية التي عرضها mm (40–20) وسمكها ليس أقل من 4 mm، قضبان الحديد قطر mm (20–10) أو سلك أرضي غير مناسب للتعليق على الأبراج، يستخدم. فمثلاً، عند $l=20$ m، $d=1$ cm، $h=0.5$ m، $\rho=100\ \Omega.\text{m}$ فإن مقاومة جهاز تأريض الشعاع تساوي:

$$R_{ray} = \frac{100}{2\pi \times 20} \ln \frac{2000^2}{50 \times 1} = 8.97\ \Omega$$

ومقاومة جهاز تأريض على هيئة حلقة $(D = l/\pi = 6.37\ \text{m})$ تساوي:

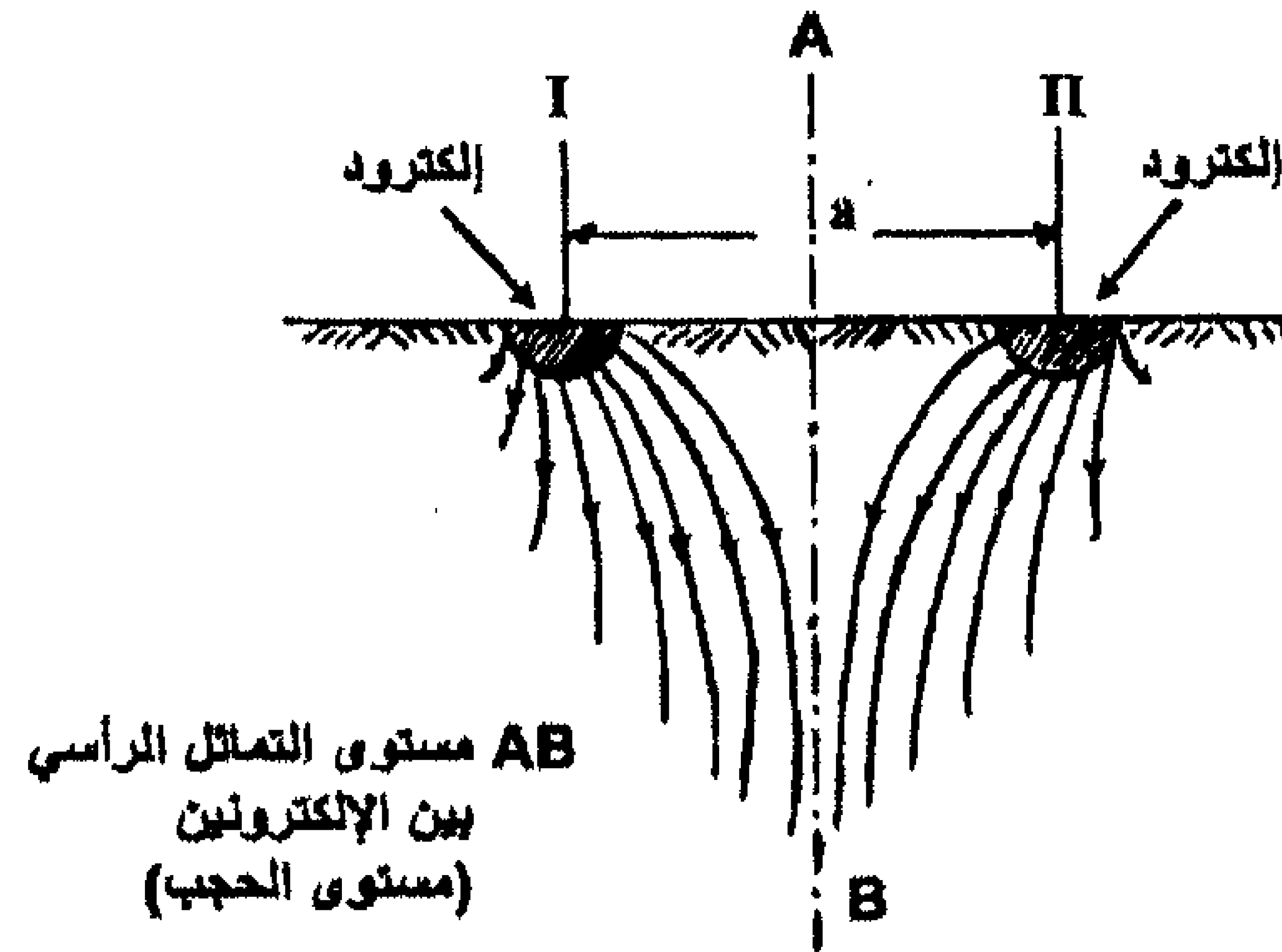
$$R_{ring} = \frac{100}{2\pi^2 \times 6.37} \ln \frac{4\pi \times 637^2}{50 \times 1} = 9.17\ \Omega$$

ولإنشاء نظام تأريض لا تتعدى مقاومة التأريض فيه القيمة المسموحة، فمن الضروري استخدام عدة إلكترودات فيما بينهم على التوازي.

فمثلاً لتأريض حماية لمحطات فرعية 110 kV أو 220 kV، حتى في تربة جيدة $(\rho = 100\ \Omega.\text{m})$ من الضروري تمديد حوالي 100 إلكترود أنبوبي، موصلة فيما بينهما بأسلاك مقابلة counterpoises. في نظام التأريض المعقد هذا، فإن التيار المحمول بعيداً إلى الأرض، سوف يمر بعيداً خلال كل أنابيب الإلكترودات الرأسية المتصلة على التوازي وكذلك الأسلاك المقابلة.

في حالة المقاومة المتساوية R لكل من عدد n من الإلكترودات وغياب التأثير المتبادل لكل إلكترود تأريض منفرد، سنحصل على المقاومة الإجمالية لتأريض النظام كالآتي:

$$R_n = \frac{R}{n}$$



الشكل 12.33: المجال الكهربي لإلكترودين نصفا كرويين موضوعان عند مسافة محدودة بينهما a

وفعلياً بسبب التأثير المتبادل للإلكترودات على بعضها، فإن مقاومة التأريض للنظام ستكون أكبر من تلك المحسوبة حسب تلك الصيغة. ولشرح ذلك، سنفحص أبسط نظام من إلكترودان [الشكل 12.33]. إذا وضعت هذه الإلكترودات عند مسافة لانهائية من بعضها، فإن التأثير المتبادل لمجالاتهم لن يتواجد وسيمر التيار من كل منهما إلى الأرض منتظماً من كل الجوانب.

مع وضع الإلكترودان عند مسافة محددة من بعضهما، فإن التيار I من الإلكترود لن يمر في جزء الفراغ الذي على يمين مستوى التماثل الرأسي AB، والذي يعمل كحائل لا يسمح لهذا التيار بالمرور. تيار الإلكترود الآخر يوصل نفسه بطريقة مشابهة. ونتيجة للحجب المتبادل للإلكترودات، فإن المقطع المستعرض للتربة التي يمر منها التيار من كل إلكترود تنخفض، وتزداد مقاومة كل إلكترود وستكون مقاومة النظام المكون من n إلكترود مساوية للآتي:

$$R_{sys} = \frac{R}{n\eta} = \frac{R_n}{\eta} \tag{27.12}$$

حيث $R_n = R/n$ مقاومة n من الإلكترودات الموصلة توازي الموجودة عند مسافة غير محدودة بينهما.

$\eta < 1$ معامل الحجب أو معامل الاستخدام للنظام باعتبار الزيادة في مقاومة الإلكترودات الموضوعة عند مسافة محدودة بينهما.

ليس صعباً إيجاد معامل الاستخدام لحالة الإلكترودين نصفا الكرويان الموضحان في الشكل 12.33. بسبب التماثل، سيكون التيار المحمول بعيداً بواسطة كل إلكترود مساوياً لـ $I/2$. الجهد المشترك للإلكترودات المتصلة توازي سيكون:

$$V = V_I = V_{II}$$

يحدد جهد كل إلكترود في النظام بواسطة جهد الإلكترود بسبب التيار $I/2$ المار بعيداً عنه وبواسطة الجهد المضاف إليه بسبب مجال الإلكترود الآخر الموجود عند مسافة a منه [الشكل 12.33].

$$V = \frac{I}{2}\frac{\rho}{2\pi r_0} + \frac{I}{2}\frac{\rho}{2\pi a}$$

من هنا فإن مقاومة النظام لإلكترودين نصف كرويين يكون:

$$R_{sys} = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{a}\right) \tag{28.12}$$

ويكون معامل الاستخدام η لنظام التأريض هو:

$$\eta = \frac{\frac{R}{n}}{R_{sys}} = \frac{\frac{\rho}{2\times 2\pi r_0}}{\frac{\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{a}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{r_0}{a}} \tag{29.12}$$

من المعادلة (12.29) نرى أن معامل الاستخدام ينخفض بانخفاض المسافة a بين الإلكترودات وزيادة أبعادها.

في الحالات الأكثر تعقيداً لا يمكن إيجاد معامل الاستخدام بهذه الوسائل البسيطة ويحدد عادة من جداول ومنحنيات نحصل عليها بحسابات أو تجارب.

١٢-٦-٥ اختيار وحسابات أنظمة التأريض المعقدة

Choice & Calculations of Complicated Earthing Arrangements

للحصول على القيمة الضرورية لمعاوقة الدفع لنظام تأريض واقي من الصواعق، حتى في أي تربة جيدة، يصبح من الضروري استخدام نظام تأريض معقد يتكون من عدد من أعمدة إلكترودات التأريض البسيطة الموصلة على التوازي أو سلك مقابل [موازن].

إذا كان R_i هي معاوقة الدفع المحسوبة لكل إلكترودات التأريض البسيطة المتوازية بدون اعتبار التأثير المتبادل لهم، فإن معاوقة الدفع الفعلية لنظام التأريض المعقد سيكون:

$$R_{i_{sys}} = \frac{R_i}{\eta_i}$$

حيث $\eta_i =$ معامل الاستخدام الدفعي لنظام التأريض البسيط.

بالنسبة لأنظمة التأريض المجمعة يكون المعامل الدفعي للاستخدام η_i أصغر من ذلك الذي في نظام الحالة المستقرة، حيث إن تحجب الإلكترودات سيكون أكبر في وجود منطقة قوس حولهم. منطقة القوس، تزيد من أبعاد الإلكترودات، وهكذا تزيد من تأثيرهم على بعضهم البعض. لذلك، فإن معامل الاستخدام الدفعي لنظام معطى وأبعاد الإلكترودات لا تكون كمية ثابتة ولكنها تعتمد على سعة التيار، المقاومة النوعية وأيضاً على شدة انهيار التربة. وعلى ذلك، تكون حسابات معامل الاستخدام الدفعي صعبة جداً ويمكن تنفيذها تقريباً للأنظمة البسيطة فقط.

إمكانيات تصميم إنشاءات منطقية لأنظمة التأريض المعقدة وتقدير معاوقتهم الدفعية في أي تربة لأي بارامترات من التيارات الدفعية يتم بعمل النماذج الفيزيائية لأنظمة التأريض القائمة على نظرية المماثلة.

لضمان قيم مقبولة لمعاوقة دفع التأريض، يجب استخدام نظام تأريض مجمع يحمل بعيداً تيار الصواعق بكفاءة.

معاوقة دفع تأريض في حدود $10\ \Omega$ في تربة عادية لها مقاومة نوعية $\rho = (50\text{–}400)\ \Omega.\text{m}$ يمكن ضمانها بأنظمة التأريض المجمعة.

في أنواع التربة السيئة نسبياً لإنجاز تأريض مقاومة $10\ \Omega$، سيكون مطلوب كمية من الإلكترودات الأنبوبية والتي بسبب التحجب لا يمكن استخدامها جيداً عند مسافة كبيرة من مكان قدوم التيار. لذلك، تنتشر الأنابيب عبر 2، 3، 4 أشعة من أنابيب التأريض، وتتزايد في المقابل أطوالها.

أنظمة التأريض الأكثر اقتصاداً بالنسبة لتكلفة المعدن والتي تضمن معاوقة دفعية $Z_i \approx 10\ \Omega$ عند تيار $100\ \text{kA}$ في تربة لها مقاومة نوعية $\rho = (100\text{–}650)\ \Omega.\text{m}$ يمكن أن تستخدم لتأريض أبراج خطوط النقل وسواري الصواعق منفصلة الإقامة للمحطات الفرعية.

بالنسبة لأنواع التربة التي تَعْطُب بالتجفيف، من المفضل استخدام أنظمة تأريض مصنوعة من إلكترودات أنبوبية.

يتحقق التحكم في نظام تأريض الوقاية من الصواعق بقياس مقاومة كثافة صغيرة وتردد التيار، أي بقياس مقاومته الساكنة R. التغير من القيمة المقاسة R إلى المعاوقة الدفعية يتم بمساعدة معامل دفع، قيمته حسب بيانات القياس على نماذج أنظمة التأريض عند تيار $I = 100\ \text{kA}$ تكون في حدود:

- $\alpha_i = 0.25$ في تربة مع $\rho = 100\ \Omega.\text{m}$.
- $\alpha_i = 0.60\text{–}0.75$ في تربة مع $\rho = (2\text{–}6.5)\times 10^{12}\ \Omega.\text{m}$.

١٢-٦-٦ تأريض موصلات الصواعق للمحطات الفرعية

The Earthing of Lightning Conductors of Sub-stations

تركيب وتأريض موصلات الصواعق للمحطات الفرعية $35\ \text{kV}$ يتم بطرق مختلفة. من وجهة نظر الحماية من الصواعق، فإن إقامة موصلات صواعق على المحطات الفرعية -من الواضح- أنه أكثر إلحاحاً واقتصاداً. مع تلك الإقامة، فإن منطقة الوقاية تستخدم بكاملها وارتفاع موصلات الصواعق ينخفض مقارنة مع موقعهم على الأرض. ومع ذلك، فإن إقامة موصلات الصواعق على المنشآت المعدنية للمحطات الفرعية تقرر قبل تداول سؤال تأريضها على الكنتور المشترك للتأريض الواقي للمحطة الفرعية. وهذا لا يكون مسموح به دائماً بسبب خطر الشرر الراجع من عزل المحطة الفرعية.

عندما يمر التيار الدفعي للصواعق إلى الأرض، فإن كنتور التأريض الواقي للمحطة الفرعية، يتصرف مثل نظام تأريض طويل ذو طول كبير، والذي بسببه يمكن أن تكون المعاوقة الدفعية أكبر من المقاومة الساكنة لها بسبب التأثير زائد القدرة للمحاثة على عمليات–القوس.

إقامة موصلات الصواعق على منشآت المحطات الفرعية مع توصيلهم بكنتور التأريض يكون مرغوباً في المحطات الفرعية 110 kV وأعلى، والتي تكون فيها قيمة المقاومة الاستاتيكية لكنتور التأريض صغيرة [$R \leq 0.5\ \Omega$] والمتانة الدفعية لعوازل تعليق السلسلة $V_{50\%} > 650$ kV.

حتى مع تيار صواعق 150 kA ومعاوقة دفعية لكنتور التأريض، تتعدى مقاومته الساكنة بعدة مرات، يمكن أن لا يكون خطر هنا من الشرر الراجع لعوازل التعليق.

بسبب خطر الشرر الراجع، فإن إقامة موصلات صواعق الإطار القنطري لمحول لا يوصى به. إلى جانب ذلك، يجب وضع نظام تأريض مجمع إضافي يتكون من أنابيب قليلة في الجوار المتوسط للمنشأ الداعم لموصلات الصواعق.

بسبب هبوط الجهد الحثي في الموصلات العامة للتأريض، تنخفض إمكانية الشرر الراجع لأي جهاز بالتناسب مع فاصلهم عن مكان توصيل موصلات الصواعق لكنتور التأريض. بالنسبة للمحولات فإن هذه المسافة يجب ألا تقل عن 15 m .

بالنسبة للمحطات الفرعية 35 kV، التي لها متانة دفعية للعزل أقل –وفي نفس الوقت– المقاومة الساكنة الأعلى لكنتور التأريض [$R \leq 10\ \Omega$] –حسب المواصفات القياسية– يوصى بأن يكون لها موصلات صواعق منفصلة الإقامة مع تأريض مستقل. المسافة عبر الهواء والأرض إلى موصل الصواعق منفصل الإقامة ونظام تأريضه يتم اختيارها حسب مواصفات بند ١٢–٥ السابق.

ومع ذلك، تبين الحسابات أنه في أنواع التربة الجيدة فإن تقوية كنتور التأريض للمحطات الفرعية 35 kV بواسطة إلكترودات إضافية واستخدامها لتأريض موصلات الصواعق يكون حلاً اقتصادياً كبيراً.

١٢-٧ مانعات الصواعق [التمور] Lightning or Surge Arrestor

١٢-٧-١ معلومات عامة General Information

أرض المحطات، المحطات الفرعية والأهداف الأخرى لها مساحة محددة يمكن حمايتها جيداً من ضربات الصواعق المباشرة بمساعدة سواري صواعق جيدة التأريض. وليس من الممكن حماية خطوط النقل بنفس درجة الاعتمادية لأنه حتى تعليق أسلاك أرضية بامتداد الطول الكلي لخط

لن يمنع بالكامل احتمال ظهور جهود عالية على موصلات الخط. موجات الجهد العالي التي تنشأ على الخطوط أثناء ضربات الصواعق التي تصل إلى المحطة الفرعية ويمكن أن تكون خطيرة لعزل المعدة المقامة هناك. وفي هذا الأسلوب، فإن حماية عزل المعدة الكهربية من الجهود العالية للصواعق لا يمكن أن ينجز بمساعدة موصلات صواعق فقط، فالوسائل الإضافية للحماية تكون أساسية والتي ستمنع تدمير العزل والتدمير المرتبط بذلك في النظام.

ونعرف أنه لتجنب الشرر أو التثقب لأي منشأ عازل، يجب تركيب ثغرة شرر موازية له، خصائص الفولت–ثانية لثغرة الشرر مع كل نقطها يجب أن تقع تحت خصائص الفولت–ثانية للعزل المراد حمايته. ومع ذلك، لتحقيق هذا التنسيق لخصائص الفولت–ثانية فإن ذلك يكون بعيداً عن البساطة. فعلياً أثناء تركيب العزل تتخذ كل الإجراءات لتساوي المجال الكهربي حتى تنخفض شدة التفريغ ومن الممكن تخفيض أبعاد العزل. لذلك، فإن عزل المحطة الفرعية له خصائص الفولت–ثانية ناعمة نسبياً. وفي المقابل، من الاعتبارات الإنشائية، فإن ثغرات الوقاية يكون لها عامة إلكترودات طراز عمود، أي أنها تمتلك مجال غير منتظم بحدة تكون فيه الزيادة الحادة في جهد الانهيار عند أزمنة صغيرة مميزاً. وبالتالي، أثناء محاولة حماية عزل المحطة الفرعية بواسطة ثغرات العمود يمكن تركيب 2 ثغرة شرر خصائص أحدهما أعلى من الأخرى وموصلين توازي وتكون الثغرة ذات الخصائص السفلية وقاية للأعلى حيث بواسطة انهيارها أولاً تحمي الأخرى. ومن ذلك نرى أنه عند أزمنة صغيرة فإن تثقب العزل المراد حمايته يكون ممكناً.

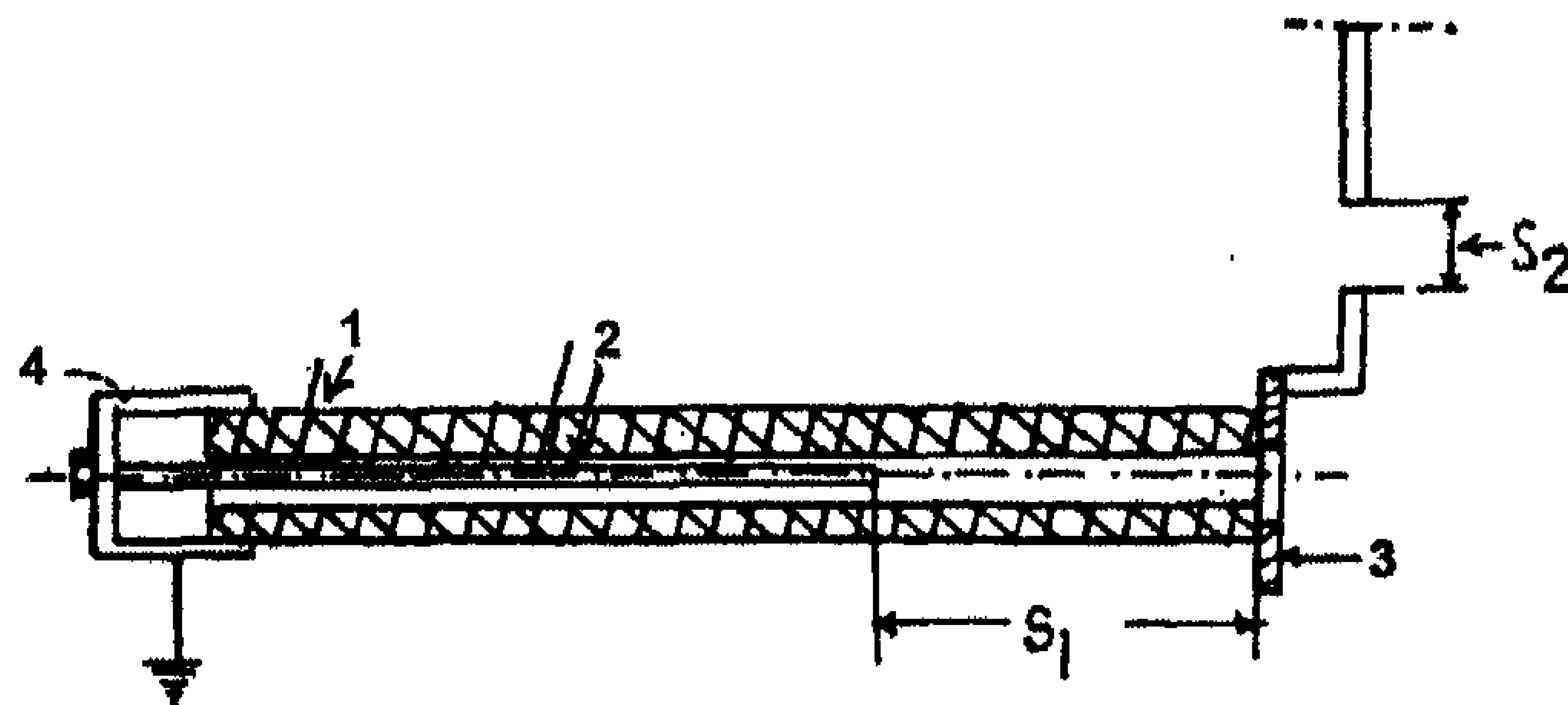
ومازالت ثغرة الشرر الواقية عيباً هاماً جداً آخر. والحقيقة هي أن كل انهيار لهذه الثغرة يؤدي إلى دائرة قصر للأرض من خلال القوس الناشئ بين إلكترودات الثغرة. في الأنظمة ذات التعادل المؤرض، تؤدي إلى تقطع عاجل لمكان التدمير. وإذا استخدمت ثغرة شرر لحماية محطة فرعية، فإن تثقبها سيعني دائرة قصر على القضبان العمومية busbars والذي يشكل واحد من الأعطال الأكثر خطورة في النظام.

لذلك، بالرغم من استخدام ثغرات الشرر أحياناً كوسائل إضافية لحماية العزل، إلا أنه من الضروري أن يكون لدينا جهاز أكثر جودة لحماية العزل، وبالإضافة لذلك، لن يسمح بالتقطعات. هذه الأجهزة هي مانعات الصواعق lightning arrestors، والتي تختلف عن ثغرات الشرر –أولاً– بحقيقة أنهم بأنفسهم يطفئون القوس الناتج بين الإلكترودات في زمن قصير أقل من زمن مرحل الحماية. والآن يستخدم نوعان من مانعات التمور surge arrestors:

١. مانعات تمور أنابيب الطرد، وتقام أساساً على خطوط النقل.
٢. مانعات تمور الصمام الذاتي، لحماية تركيبات المحطة الفرعية.

١٢-٧-٢ مانعات تمور أنبوب الطرد Expulsion Tube Surge Arrestors

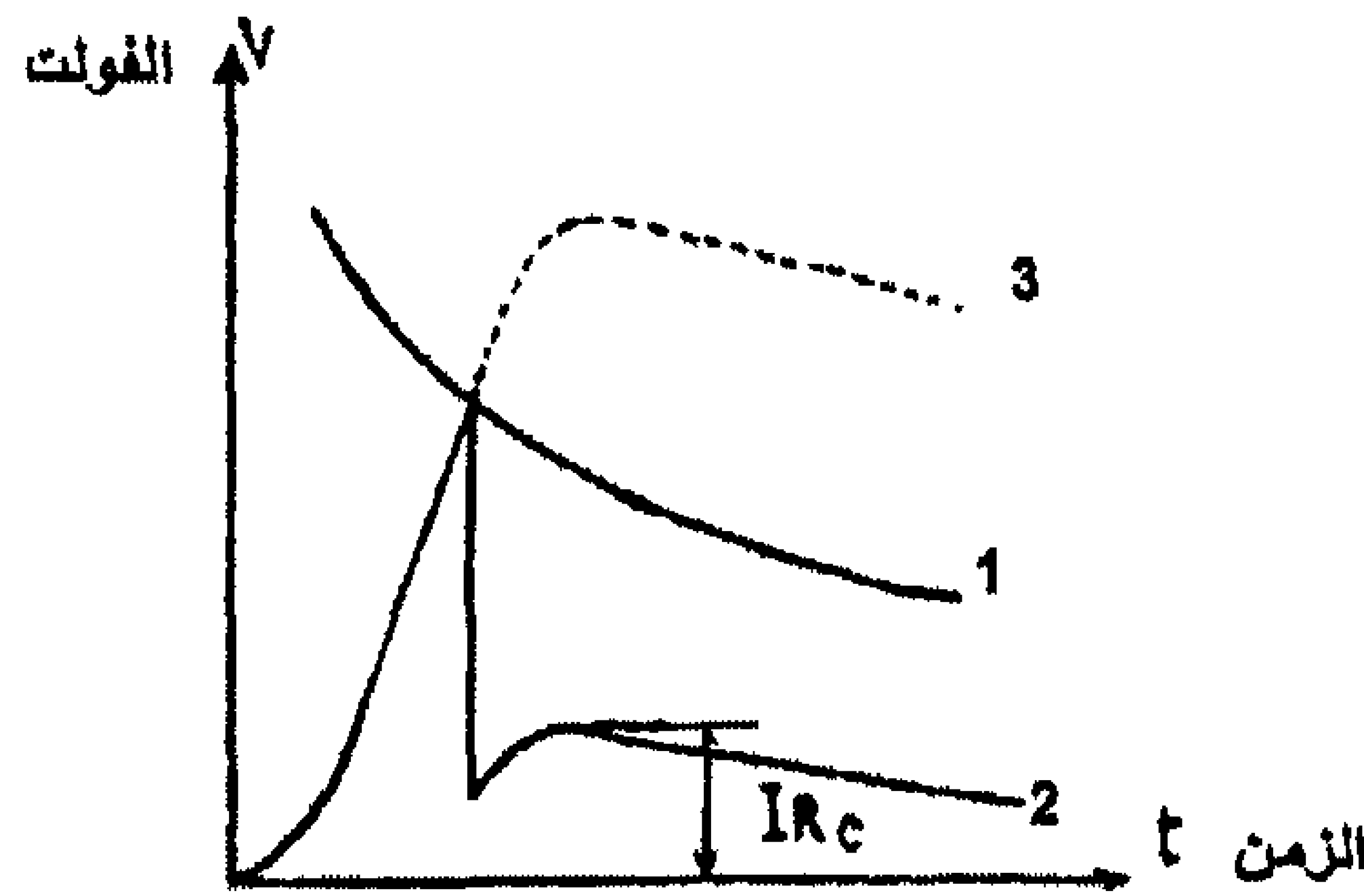
تركيب وتوصيل مانعات صواعق أنبوب الطرد موضحة في الشكل 12.34. وتتكون المانعة من أنبوب مصنوع من مادة مولدة للغاز. يغلق أحد طرفي الأنبوبة بواسطة غطاء معدني مركب عليه إلكترود عمود داخلي. عند الطرف المفتوح من الأنبوبة، يوجد إلكترود ثاني على هيئة حلقة. الثغرة S_1 بين الإلكترود العمود والحلقي تسمى "ثغرة داخلية" أو "ثغرة إطفاء القوس". والأنبوبة مفصولة عن موصل الطور بواسطة ثغرة شرر خارجية S_2، وإلا ستتحلل المادة المولدة للغاز تحت تأثير تيارات التسرب.



الشكل 12.34: مخطط يوضح تركيب مانعة أنبوب الطرد. (1) أنبوبة مولد الغاز؛ (2) إلكترود عمود؛ (3) إلكترود حلقي؛ (4) غطاء معدني؛ S_1 ثغرة شرر داخلية؛ S_2 ثغرة شرر خارجية

وتعمل مانعة تمور أنبوب الطرد بالأسلوب التالي: أثناء تأثير موجة جهد عالي جوية عليها، تكسر كلا الثغرتين [لا يمكن حدوث الشرر عبر السطح الخارجي حيث إن مسافة التفريغ عبر هذا السطح تكون أكبر كثيراً من طول الثغرة الداخلية] ويحمل التيار النبضي بعيداً إلى الأرض. بعد انتهاء الدفع [النبض] فإن تيار تردد القدرة –والذي يحدث أيضاً أن يكون تيار دائرة قصر– يستمر في التدفق خلال المانعة. يحدث انبعاث شديد للغاز في الأنبوبة تحت تأثير درجة الحرارة لقناة قوس التيار المتردد. ويزداد الضغط في الأنبوبة إلى قيمة تبلغ عشرات قليلة من الضغط الجوي. الغازات، المارة في اتجاه الطرف المفتوح للأنبوبة، ترفع من فعل النفخ ونتيجة لذلك يطفأ القوس عند بداية نشأته. عندما تعمل المانعة، يسمع صوت يشبه طلقة مدفع وتندفع غازات ساخنة خارجة من الأنبوبة.

الفعل الواقي لمانعة تمور أنبوب الطرد يتميز بخصائص الفولت–ثانية له وبواسطة مقاومة تأريضه. خصائص الفولت–ثانية تحدد جهد تشغيل المانعة، ومقاومة التأريض تحدد الجهد الدفعي الباقي على المانعة بعد تشغيلها [الشكل 12.35]. وتعتمد خصائص الفولت–ثانية على أطوال الثغرات الخارجية والداخلية للمانعة ولها خصائص ظاهرة للثغرات مع المجالات غير المنتظمة الحادة. ويتم اختيار طول ثغرة الشرر الخارجية حسب شروط حماية العزل ويمكن أن تنظم داخل حدود محددة. أما طول ثغرة الشرر الداخلية فإنها تنشأ بالتوافق مع خواص إطفاء القوس للمانعة ولا تخضع لأي تنظيم.

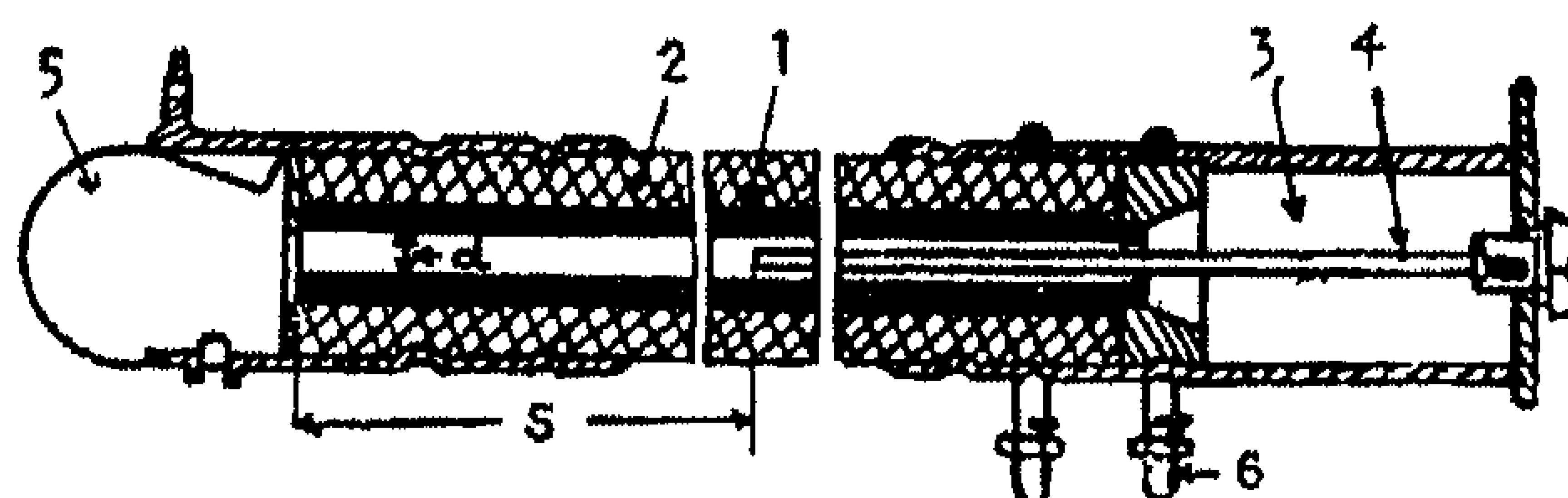


الشكل 12.35: الفعل الواقي لمانعة أنبوب الطرد. (1) خصائص الفولت–ثانية؛ (2) الفولت على المانعة؛ (3) الموجة المرتطمة بالمانعة

للإطفاء الناجح لقوس التيار التابع، فإن التوليد المكثف للغاز في الأنبوبة، والذي يعتمد على قيمة التيار المار خلالها، يكون أساسياً. وبسبب ذلك، توجد نهاية دنيا للتيارات التي تُقْطَع بواسطة المانعات. فعند تيارات كبيرة فإن توليد غاز غزير جداً يمكن أن يسبب زيادة غير عادية في الضغط وتفجير الأنبوبة أو انتزاع الغطاء المعدني الطرفي بعيداً عن الأنبوبة. لذلك، بالنسبة لمانعات أنبوب الطرد فإن الحد الأعلى للتيارات المارة خلالها، والتي عندها يكون إطفاء القوس غير مرتبط بالتدمير الميكانيكي للمانعة، يجب أن يحدد بالمثل. قيمة النهايات العظمى والصغرى للتيارات المقطوعة تعتمد على أبعاد القناة الداخلية للمانعة. تخفيض طول الثغرة الداخلية وبالمثل زيادة قطرها يسبب إزاحة لكلا النهايتين من التيارات في اتجاه القيم الأكبر. وفي المقابل، فإن زيادة طول الثغرة الداخلية وتخفيض قطرها يسبب إزاحة نهايتي التيار في اتجاه القيم الأصغر. وهذه التبعية تسمح بتصنيع مانعات أنبوب طرد لها نهايات مختلفة للتيارات التي تُقطع.

أثناء تركيب مانعات أنبوب الطرد عند أي نقطة من الشبكة، فإن تيار دائرة القصر عند هذه النقطة يجب أن يختبر. ويجب أن تقع قيمته داخل مدى التيارات المقطوعة بالمانعة.

القناة الداخلية لأنبوبة إطفاء القوس تبلى [تتآكل] نتيجة العمل المتكرر للمانعة. مع زيادة تقدر بحوالي %(25–20) من القطر الداخلي، تتوقف مانعة أنبوب الطرد على مواصفات المصنع المحددة للتيارات المقطوعة وتخضع للاستبدال والإحلال.



الشكل 12.36: مانعة أنبوب طرد بكاليت ليفي لـ110 kV. (1) أنبوبة ليفية؛ (2) أنبوبة بكاليت؛ (3) حجرة نفخ مغلقة؛ (4) إلكترود؛ (5) مبين تشغيل المانعة؛ (6) طوق تثبيت المانعة؛ S ثغرة الشرر الداخلية

يصنع الاتحاد السوفيتي حالياً مانعات مع أنابيب بكاليت–ليفية [طراز $PT\phi$] ومع أنابيب من بلاستيك الفينيل [طراز PTB]. ويبين الشكل 12.36 تركيب مانعة بكالايت–ليفية طراز $PT\phi$. تستخدم الألياف fibre [الفبر] كمادة مولدة للغاز في هذه المانعة. وحيث إن الألياف لا تملك المتانة الميكانيكية المطلوبة، التي تكفي لمقاومة الزيادة المحسوسة في الضغط في الأنبوبة عند توقيت تشغيل المانعة، فإن الأنبوبة الليفية تُلف من الخارج بورق مُبَكْلَت bakelized paper لكي تزيد من المتانة الميكانيكية للأنبوبة. استرطابية البكاليت تتطلب أن يكون غطاء السطح الخارجي لمانعة أنبوب الطرد مدهوناً بورنيش مضاد للرطوبة. ولهذا الغرض يستخدم طلاء المينا $\pi B-26$ [مينا كلوريد البولي فينيل] والذي لا يفقد خواص عزله لمدة (5–4) سنة في الخدمة. وهذا يمنع ضرورة الفك السنوي لمانعة أنبوب طرد البكاليت الليفي للاستبدال.

خصوصية مانعة الصواعق طراز $PT\phi$ هي حجرة مغلقة بالقرب من الطرف المغلق للأنبوبة. أثناء مرور التيار يزداد الضغط في الحجرة المغلقة. عند توقيت مرور التيار خلال القيمة صفر، يهبط الضغط في منطقة ثغرة القوس وتميل الغازات المتجمعة في الحجرة للتدفق في اتجاه طرف التصريف [العادم]، وهكذا يقوي نفخ القوس ويعزز إطفاءه.

وتزود مانعات الطراز $PT\phi$ بمبين للتشغيل، عبارة عن لوح معدني منحني، أحد أطرافه مثبت على غطاء الطرف المفتوح للمانعة. الطرف الحر للوح يُلقى بعيداً عن الأنبوبة أثناء تشغيل المانعة.

وتصنع المانعات طراز $PT\phi$ لجهود kV (3–110). بغض النظر عن الجهد الاسمى، تميز المانعات بحدود التيارات القاطعة. يذكر هذين الحدين على مسكوكه المانعة. فمثلاً:

$$PT\phi\frac{110}{0.8-5}$$

تعني أنبوب طرد، مانعة بكاليت ليفي طراز $PT\phi$ لـ 110 kV لها حدود تيارات قاطعة $kA_{r.m.s}$ (0.8–5). الأبعاد الأساسية وخواص مانعات أنبوب طرد البكاليت الليفي معطاة في الجدول 12.4.

المانعات طراز PTB مع أنابيب من بلاستيك الفينيل [الشكل 12.37] تمتلك عزل أفضل وخواص توليد الغاز تكون أفضل في التركيب مقارنة بطراز $PT\phi$. بلاستيك الفينيل يكون غير استرطابي ويحتفظ بخواص عزله أثناء العمل في الهواء المفتوح، لذلك فإن المانعات طراز PTB لا تطلى بالمينا. إمكانية توليد الغاز العالية لهذه المانعات تسمح بنبذ الخزان عند الطرف المغلق للأنبوبة. الفراغ الأجوف بين إلكترود العمود وجدران الأنبوبة عبر طول عمود الإلكترود يفي بدور الخزان [الحجرة المغلقة]. المتانة الميكانيكية العالية لبلاستيك الفينيل بالترابط مع أحمال التصادم تسمح بتجهيز مانعات PTB لها مدى كبير من تيارات القطع [حتى 15 kA]. الأبعاد الرئيسية وخواص المانعات طراز PTB معطاة أيضاً في الجدول 12.4.

يصاحب تشغيل مانعة أنبوب الطرد عادم من غازات عالية التأين. وبسبب ذلك، فإن مكان المانعات على المنشأ الداعم يجب أن يكون بحيث لا تسبب غازات العادم شرر بين الأطوار أو مع الأرض. لذلك، فإن موصلات الأطوار الأخرى، المنشآت المؤرضة ومناطق العادم للمانعات التي تحمي أطوار أخرى يجب أن لا تقع في منطقة عادم أي مانعة. القيم المحسوبة وأبعاد مناطق العادم معطاة في الجدول 12.5.

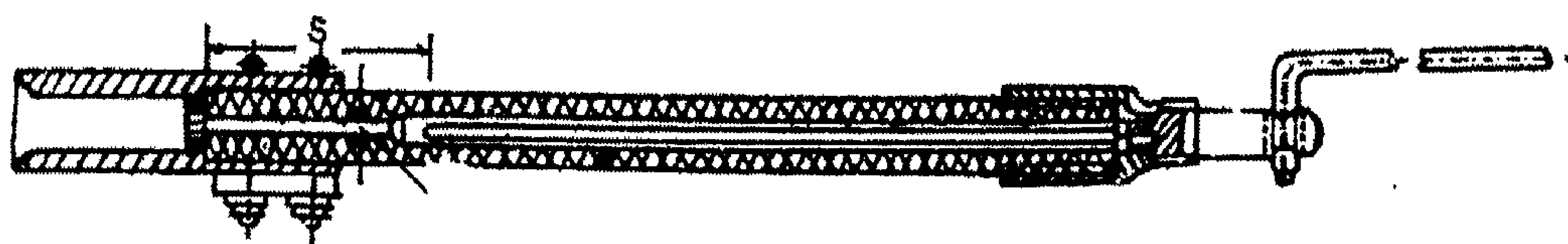
إلكترودات ثغرة الشرر الخارجية مصنوعة من صلب مبروم قطره 10 mm . أحد هذه الإلكترودات يمكن أن يخدم كموصل الخط.

الجدول 12.4 : الأبعاد الرئيسية وخصائص مانعات أنبوب الطرد طراز PT، PTB

Type of arrestor	Length of spark gaps (mm)		Maximum discharge voltage for 1.5/40 wave (kV_{max})				50 cycles flashover voltage ($kV_{r.m.s}$)		Length of arrestor (mm)	Internal diameter d (mm)
	Internal S_1	External S_2	50 per cent valve for		For a time of 2 μ sec. for		Dry	Wet		
			Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity				
				Fibre-bakelite arrestors (PTϕ)						
PTϕ 3/0.2–1.5	40	5–10	35	40–45	40–42	45–50	60	7	357 ± 8	8
PTϕ 3/1.5–7	40	5–10	35	40–45	40–42	45–50	10	7	351 ± 8	8
PTϕ 6/0.3–7	130	8–15	60–80	60–80	70–83	70–83	42	39	489 ± 20	10
PTϕ 6/1.5–10	80	8–15	55–70	55–70	67–83	67–87	–	–	489 ±20	10
PTϕ 10/0.5–7	130	20	80	80	83	83	–	–	489 ± 20	10
PTϕ 35/0.4–3	175	80–100 150–200	160–180 225–270	170–190 255–320	200–205 250–300	200–220 265–310	95–105 130–155	75–85 110–135	663 ÷ 15	8
PTϕ 35/0.8–5	175	80–100 150–200	180–195 235–270	180–195 245–285	210–230 275–330	210–230 275–330	100–105 115–125	65–75 90–105	789 ÷ 30	10
PTϕ 35/1.8–10	140	80-100 150-200	155-170 210-245	155-170 220-270	180-195 240-290	180-195 115-230	90-195 95-105	80-85	723 ± 30	12
PTϕ 110/0.4–2.2	300	350-400 450-500	410-432 455-475	455-495 530-570	495-525 550-580	560-600 640-680	215-230 240-270	200-225 250-270	1034 ± 30	8
PTϕ 110/0.8–5	350	350-400 450-500	420-450 475-505	460-490 535-550	505-535 570-600	570-620 670-720	260-285 310-355	200-210 225-240	1242 ± 10	16
PTϕ 110/1.2–7	300	350-400 450-500	410-430 455-475	455-500 530-570	495-525 550-580	560-600 640-680	215-230 240-255	200-225 250-270	1037 ± 15	16
PTϕ 110/2–10	250	350-400 450-500	385-395 405-415	430-440 450-460	500-540 580-620	560-645 730-810	–	–	1139 ± 15	20

تابع الجدول 12.4 : الأبعاد الرئيسية وخصائص مانعات أنبوب الطرد طراز PT، PTB

Type of arrestor	Length of spark gaps (mm)		Maximum discharge voltage for 1.5/40 wave (kV_{max})				50 cycles flashover voltage ($kV_{r.m.s}$)		Length of arrestor (mm)	Internal diameter d (mm)
	Internal S_1	External S_2	50 per cent valve for		For a time of 2 μ sec. for		Dry	Wet		
			Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity				
Arrestors made of vinyl plastic (PTB)										
PTB 6/0.5–5	60	10	55	57	55	58	33	32	672	6
PTB 6/2–15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PTB 10/0.5–5	60	15	58	60	60	62	42	40	672	6
PTB 10/2–15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PTB 32/2–10	140	80-100 150-200	135-155 210-260	140-165 225-285	145-170 200-275	100-114 225-288	100-110 150-180	882 145-170	882	11
PTB 110/2–8		350-400 450-500	380-405 435-460	400-430 460-490	415-450 485-520	435-470 510-575	310-335 165-395	275-300 320-350	1172	11



الشكل 12.37: مانعة أنبوب الطرد طراز PTB [بلاستيك الفينيل]

الجدول 12.5: منطقة طرد مانعات أنبوب الطرد

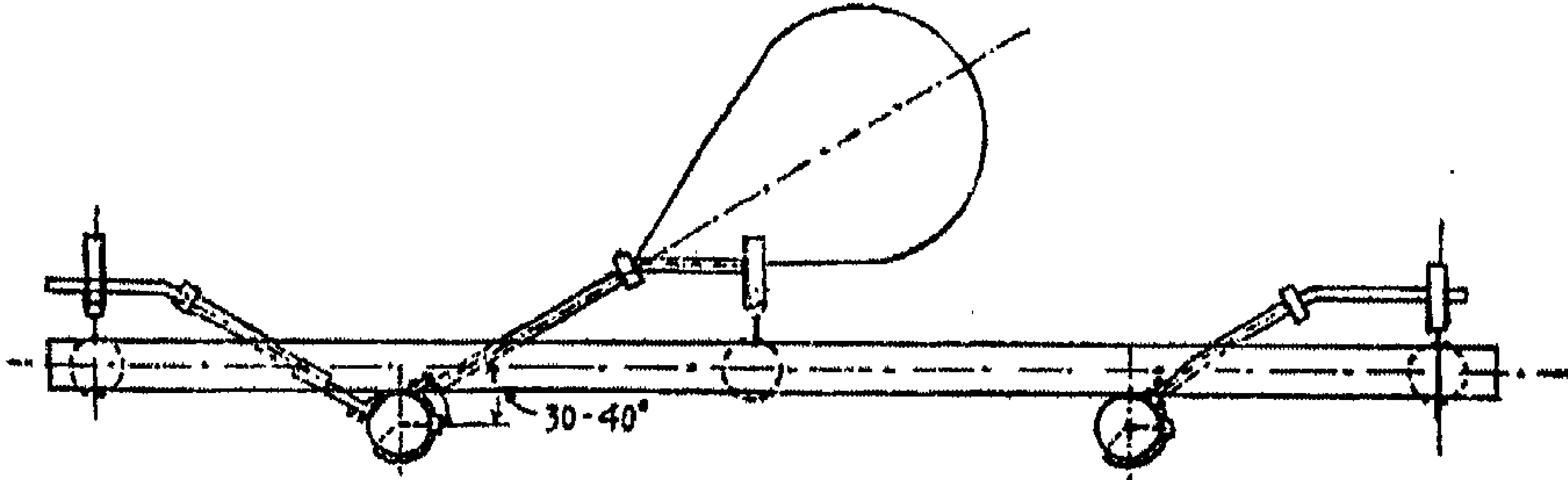
كروكي منطقة الطرد	طراز المانعة	الأبعاد (m)	
		a	*b*
	$PT\phi-110$	3	2
	$PT\phi-35$	2.5	1.5
	$PT\phi-10, 6, 3$	1.5	1
	PTB–110	2.2	3.5
	PTB–35	1.8	2.8
	PTB–10, 6	1	2

تركب المانعات بحيث يكون محورها مائل على الأفقي عند زاوية ليست أقل من 5° والطرف المفتوح موجه لأسفل. في هذه الشروط لا تستطيع الرطوبة أن تتجمع فيهم. وفي الأماكن ذات التلوث الجوي المتزايد، يجب أن يكون لمانعات الطرد ميل أكبر [حتى (45–60)°] لتحسين ظروف التنظيف الذاتي أثناء الأمطار. في الشكل 12.38 مثال لتركيب مانعة أنبوب طرد على دعامة خشبية متوسطة لـ 110 kV .

نمو القدرة وبالتالي تيارات دائرة القصر لأنظمة القدرة خلق ضرورة لتطوير مانعات أنبوبة الطرد والتي لها حد أقصى أعلى من التيارات القاطعة. في عام 1960 تم تطوير مانعات طراز PTBY في AUET وهي أنبوبة من البلاستيك فينيل رقيقة الجدران نسبياً ومقواة بألياف زجاجية مطلية براتينج أيبوكسي. وبهذا الأسلوب، من الممكن رفع الحد الأقصى للتيار القاطع حتى 20 kA، والحد الأدنى أثناء ذلك يرتفع إلى 7 kA .

العيب الرئيسي لمانعات أنبوب الطرد هو وجود حدود للتيارات المتقطعة. المانعات المقابلة لحدود التيارات المتقطعة لنقط معطاة من الشبكة، يمكن ألا تطفئ التيار التابع ويمكن أن تدمر في حالة تشغيل آني لمانعات قليلة متوازية. وكنتيجة لتقطعات قطاع معطوب من نظام أثناء

التشغيل، فإن تيار دائرة القصر عند نقطة معطاة من النظام يمكن أن يتغير أيضاً ويمكن أن يكون وراء مدى التيارات المتقطعة للمانعة. وفي هذا السياق فإن تطوير مانعات طراز أنبوب بدون تيار تابع تنفذ الآن، وهي ذات أهمية كبيرة. الفكرة الأساسية لتركيب هذه المانعات هي كالتالي: في القناة الداخلية للمانعة يتم إدخال قطعة من نفس مادة جدران الأنبوبة بين الإلكترودات وتثبت جيداً. التيار الدفعي، وبسبب فترة دوامه الصغيرة، سيمر بحرية خلال الثغرة الصغير غير العادية بين القطعة وجدار الأنبوب. في نفس الوقت يقاوم توليد الغاز الكثيف في هذا الحجم المحدود، تكون التيار التابع. وبهذا الأسلوب فإن تآكل المانعة يجب أن ينخفض بحدة وهذا يعني أن المانعة يمكن أن توضع عند أي نقطة في الدائرة بغض النظر عن تيار دائرة القصر.



الشكل 12.38 : تركيب مانعة أنبوب الطرد على عارضة مستقيمة على برج خشبي 110 kV

١٢-٧-٣ مانعات الصمام-الذاتي [الأوتوماتي] The Auto-Valve Arrestors

مانعات الصمام-الذاتي هي الجهاز الأساسي لحماية معدات المحطة الفرعية من موجات الجهد الزائدة الجوية التي ترحل بطول خطوط النقل الكهربي. عزل المحولات والأجهزة يجب أن يقاوم الجهود الزائدة الجوية المحددة بمانعات الصمام-الذاتي. وبهذا الأسلوب، تبذل الخصائص الوقائية لمانعات الصمام-الذاتي تأثيراً مباشراً على أبعاد العزل وتكلفة معدات المحطة الفرعية.

العناصر الأساسية لهذه المانعات هي ثغرات الشرر المتعددة ومقاومة التشغيل المتصلة على التوالي معها. أثناء فعل موجات الجهد الزائد الجوي على المانعة، تنكسر ثغرة الشرارة لها وتُشطر موجة الجهد الزائد، التيار الدفعي المار في الحال بعد ذلك خلال المانعة ينتج هبوط جهد، وهو ما يسمى جهد متخلف، في مقاومة تشغيل المانعة. وسيكون مرغوباً إذا كان الجهد المتخلف ثابتاً ومساوياً في المقدار لجهد انهيار ثغرة الشرر أثناء مرور تيارات الصاعقة ذات

المقادير المختلفة خلال المانعات. وليس من الممكن أن نلحظ هذه الشروط المثالية حالياً -ومع ذلك- فإن استخدام مقاومة غير خطية من مادة تسمى "فيليت" Vilit تسمح بحفظ الجهد المتخلف للمانعة عند مستوى، قريب من جهد الانهيار لثغرة الشرر مع زيادة صغيرة فقط في الجهد المتخلف مع زيادة التيار. جهد الانهيار الدفعي لثغرة الشرر والجهد المتروك على مقاومة التشغيل [الجهد المتخلف] يميز فعل الوقاية لمانعة الصمام-الذاتي.

بعد مرور تيار الصاعقة -فإن تيار- يحدد بجهد تشغيل تردد القدرة -يسمى "التيار التابع"- يستمر في التدفق خلال المانعة. ومع ذلك، فإن خاصية مادة الفيليت هي أنه عند جهود تشغيل صغيرة [مقارنة مع الجهود الزائدة الجوية] فإن مقاومتها تزداد بحدة ويصبح التيار التابع صغيراً. وبسبب ذلك فإنه أثناء مرور التيار خلال قيمة الصفر له، فإنه سينطفئ بواسطة ثغرات الشرر. جهد تردد القدرة الأكبر على المانعة -الذي عنده يقطع تيار المتابعة المار خلال- يسمى "جهد الإطفاء" وهو أحد البارامترات الهامة لمانعات الصمام الذاتي.

مقاومة تشغيل مانعات الصمام-الذاتي Working Resistance of the Auto-Valve Arrestors

قاعدة مقاومة التشغيل هي مسحوق من التقنية الكهربية للكاربوراندوم SiC. على سطح بللورات الكاربوراندوم يوجد طلاء سمكه 10^{-5} cm من أكسيد السيليكون SiO_2. المقاومة النوعية لبللورات الكاربوراندوم نفسها ليست كبيرة فهي حوالي 10^{-2} Ω.m . مقاومة الطلاء يكون متناسب غير-خطي لشدة المجال الكهربي. عند شدة المجال الصغيرة [عند الجهود غير الكبيرة جداً على مقاومة التشغيل]، تكون المقاومة النوعية للطلاء Ω.m (10^6-10^4)، وتؤثر كل الجهود على الطلاء وهي تحدد مقدار المقاومة. ومع زيادة شدة المجال، تنخفض مقاومة الطلاء بحدة وتبدأ قيمة مقاومة التشغيل في أن تحدد بمقاومة الكاربوراندوم بمفردة.

خاصية المادة المتعلقة بالتغير الحاد في مقاومتها في العلاقة مع الجهد، التي تضمن مرور تيارات كبيرة جداً عند جهود عالية جداً وتيارات صغيرة جداً عند جهود منخفضة تسمى "فعل الصمام" valve action. ومن هنا جاء اسم الجهاز "مانعة الصمام الذاتي".

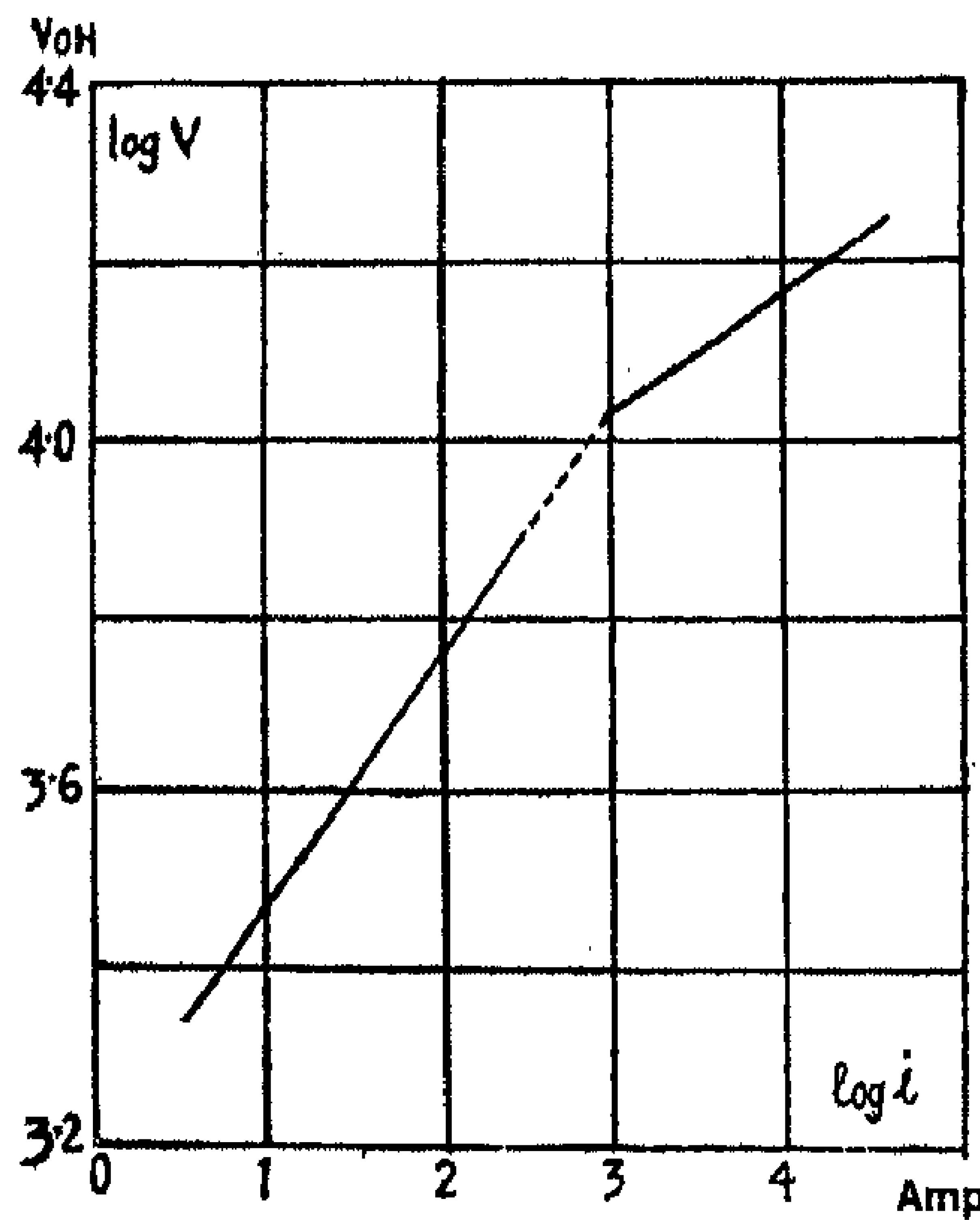
تُصنع مقاومة تشغيل مانعات الصمام الذتي على هيئة أقراص تتكون من مسحوق كاربوراندوم ومادة أسمنتية. في مواد الفيليت يستخدم غاز مسال كمادة أسمنتية. وهذا يسمح بتنفيذ حرق [تسوية] القرص عند درجة حرارة منخفضة نسبياً [في حدود مئات قليلة من °C]، أي في شروط لا تدمر خاصية طلاء الصمام. وقبل ذلك، كانت مقاومة التشغيل تصنع من

الثيريت Thyrite ويستخدم أسمنت طيني يتطلب درجة حرارة حرق عالية 1200°C . وعند درجة الحرارة تلك كان طلاء بللورات الكاربوراندوم يُدمر جزئياً.

في الشكل 12.39 موضح خصائص الفولت–أمبير لأقراص الفيليت ذات قطر 100 mm وسمك 60 mm ، والتي تستخدم في المانعات طراز PBC. ورسمت الخصائص عند موجه 20/40 μ sec. في مدى تيار A (1–10000). وكما نرى في الرسم، يمكن التعبير عن خصائص الفولت–أمبير بطولين من الخطوط المستقيمة، كل طول له ميل مختلف. لكل طول من الخط المستقيم تتحقق العلاقة التحليلية الآتية جيداً، حيث α هو معامل عدم الخطية:

$$\log V = \log A + \alpha \log I \qquad (30.12)$$

كلما صغرت قيمة α ، صغرت درجة زيادة الجهد على القرص مع أي زيادة في التيار المار خلاله. وهذا يعني أنه على مقاومة التشغيل المصنوعة من الأقراص، التي لها معامل عدم خطية صغيرة α ، فإن الجهد المتخلف سيكون أكثر استقراراً.



الشكل 12.39 : خصائص الفولت–أمبير لقرص فيليت $h = 60$ mm ، $d = 100$ mm

مناطق التيارات الكبيرة، المارة خلال المانعة أثناء الجهود الزائدة الجوية، تقابل الجانب الأيمن الثاني من خصائص الفولت–أمبير. في هذا القطاع، يكون معامل عدم الخطية α للفيليت له قيمة (0.13–0.20). الثيريت السابق استخدامه كان له $\alpha =$ (0.14–0.25) على هذا القطاع من الخصائص. وهذا يعني أنه مع أي زيادة في التيار، يزداد الجهد المتخلف على أقراص

الثيريت إلى درجة أكبر من أقراص الفيليت، أي أن أقراص الثيريت تمتلك خصائص وقاية أكثر رداءة.

الجزء الأيسر الأول من خصائص الفولت–أمبير، الذي يقابل منطقة التيارات التابعة تحدد الجهود المتخلفة على الأقراص في هذا الجزء من الخصائص بواسطة المعامل غير الخطي α الذي يساوي (0.32–0.82) للفيليت، (0.31–0.42) للثيريت.

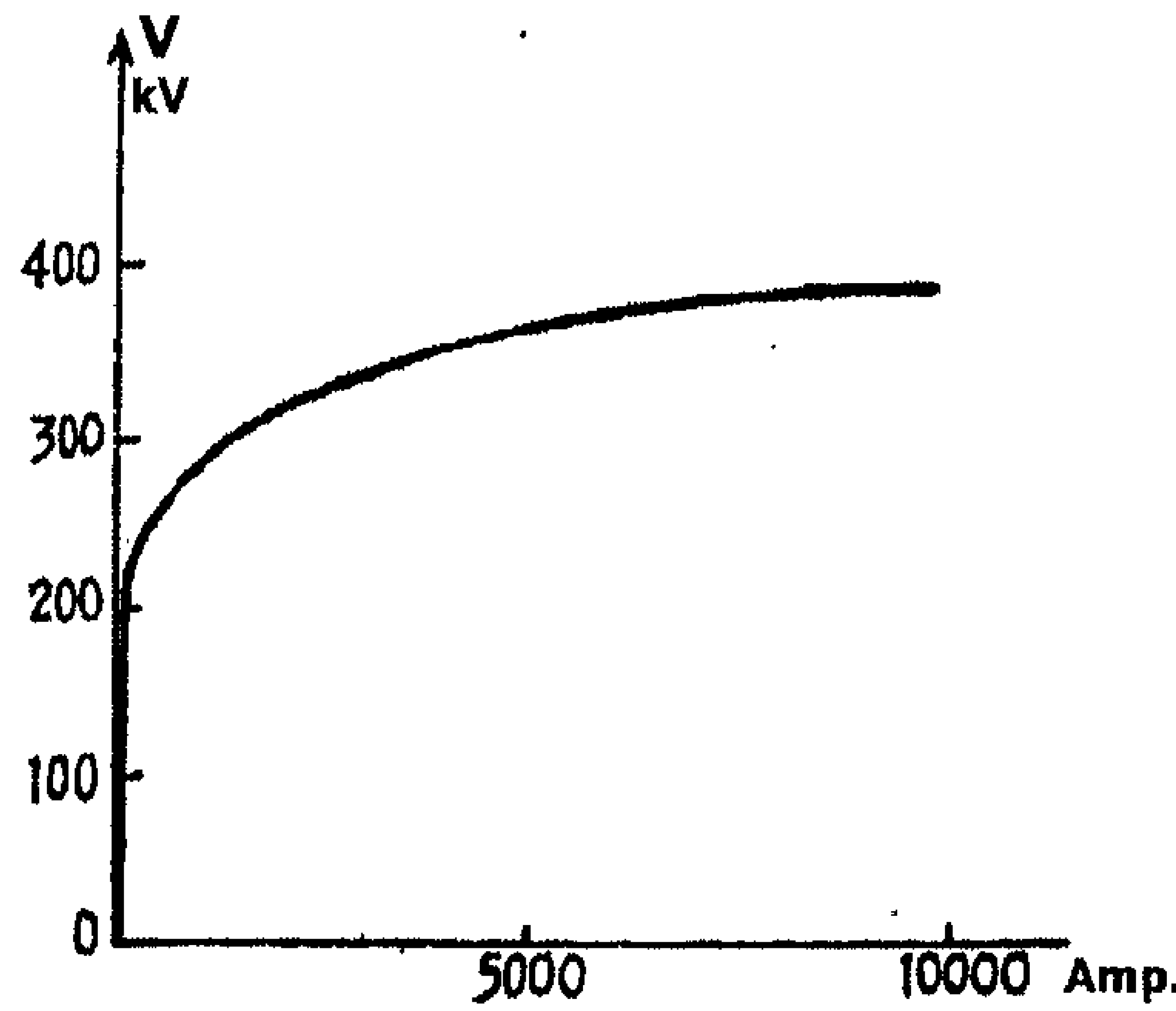
العلاقة (12.30) يمكن أن تكتب كالتالي:

$$V = A I^{\alpha} \quad (31.12)$$

من هذه المعادلة نرى أن الثابت A هو مقاومة القرص عند تيار 1 A .

وحيث إن مقاومة تشغيل مانعة الصمام–الذاتي مصنوعة من m قرص متصلة على التوالي، –من الواضح– أنه يمكن التعبير عن خصائص الفولت–أمبير للمانعة بالمعادلة:

$$V = m A I^{\alpha} \quad (32.12)$$

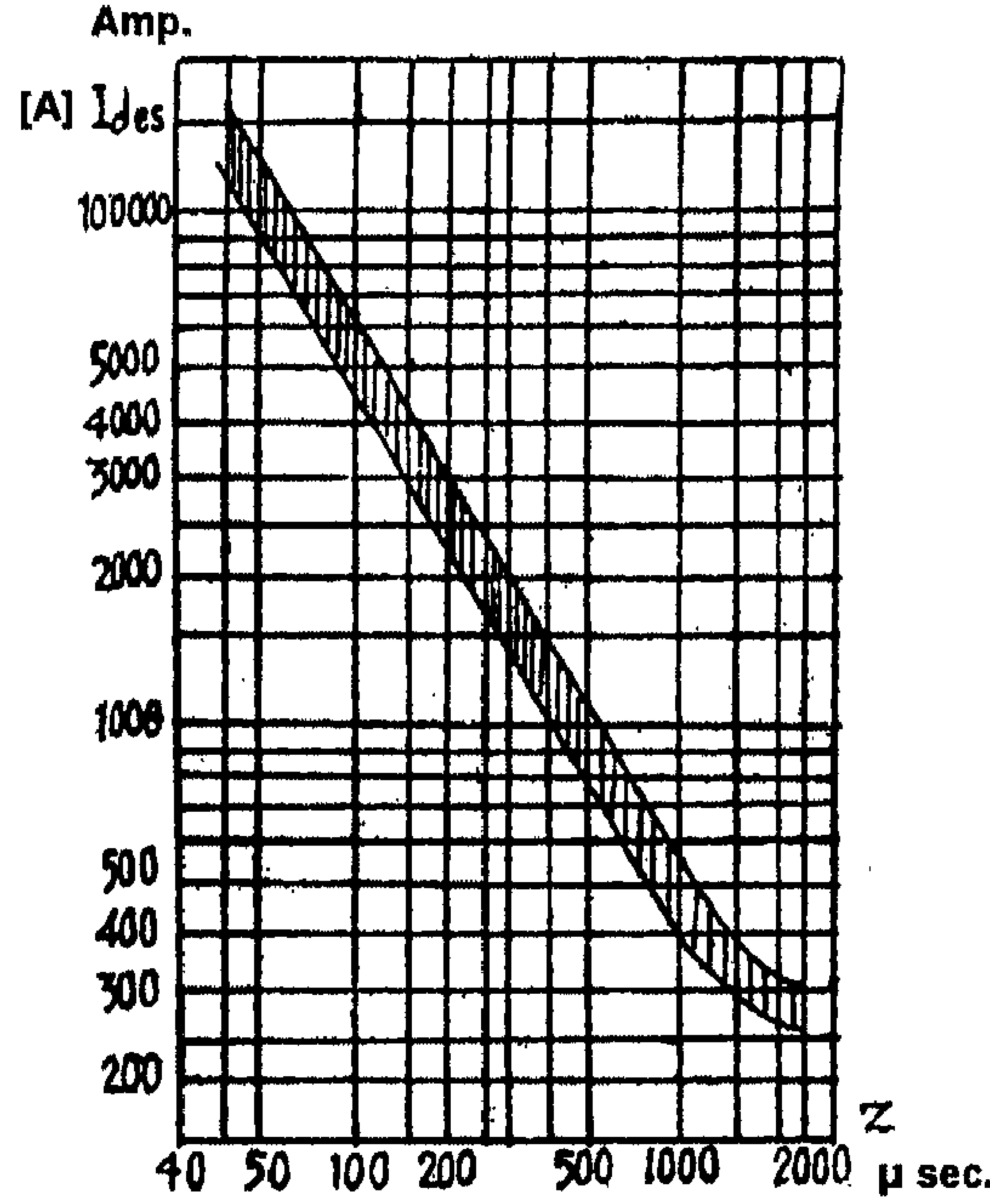


الشكل 12.40: خصائص الفولت–أمبير لمانعة طراز PBC-110

ويجب أن نتذكر أن الثوابت α ، A يجب أن تؤخذ مختلفة للأجزاء الناعمة والأكثر ميلاً من خصائص الفولت–أمبير. فمثلاً، خصائص الفولت–أمبير للمانعة طراز PBC-110 لـ 110 kV موضحة في الشكل 12.40.

بعيداً عن معامل عدم الخطية المنخفض، فإن أقراص مقاومة التشغيل يجب أن تمتلك سعة كافية، أي أن خصائصها الكهربية لا يجب أن تتغير بعد التشغيل المتكرر. كلفة الكمية الكبيرة جداً من الطاقة في مقاومة تشغيل القرص يمكن أن تؤدي إلى كسر الأقراص وفقد خواصها.

وحيث إن تدمير الأقراص يكون متعلقاً بتبديد الطاقة فيهم، فإن سعة حملهم يجب أن تعتمد على سعة التيار المار خلال مقاومة التشغيل وعلى فترة دوامهم. في الشكل 12.41 سعات وفترات دوام التيارات التي يمكن أن تمر خلال أقراص الفيليت الذي قطره 100 mm، ليست أقل من (20–30) مرة بدون تدمير الأقراص، تكون موضحة.



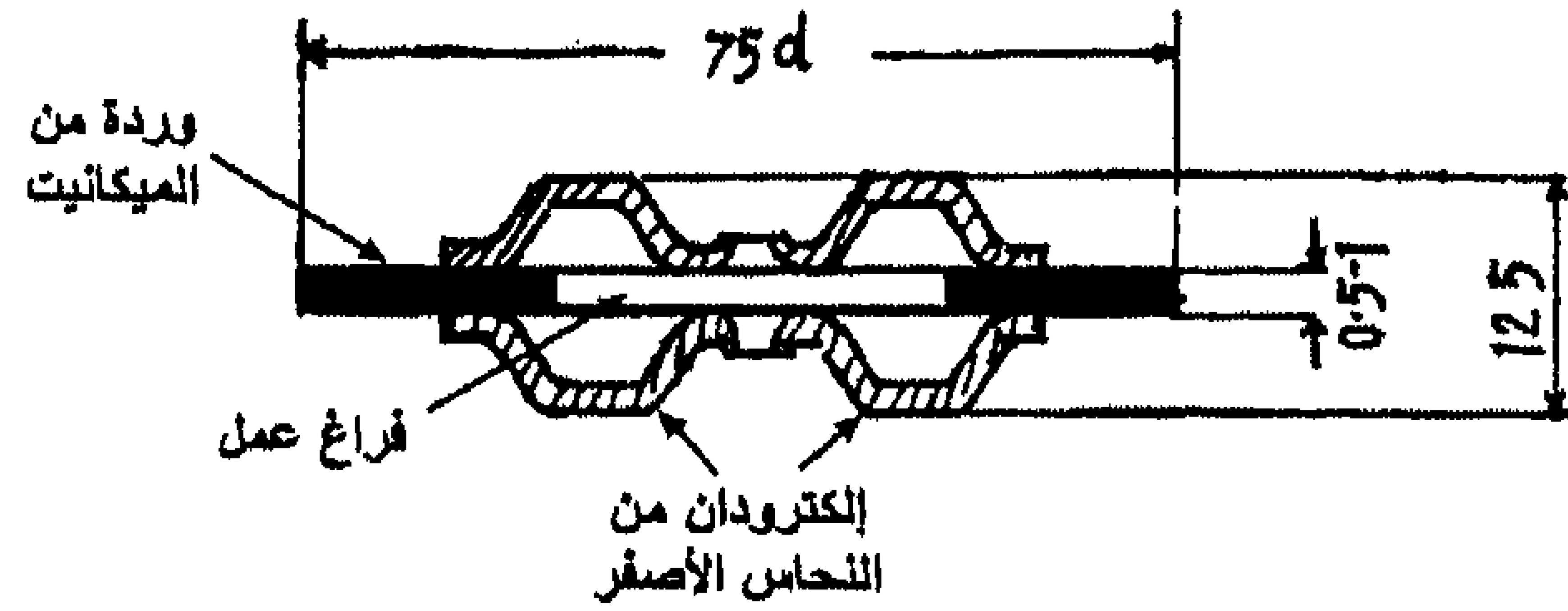
الشكل 12.41: العلاقة بين سعة الدفع المدمر وفترة دوامها لقرص فيليت قطره 100 mm

معظم الاضطرابات المميزة لمانعات الصمام–الذاتي في شروط التشغيل تكون سعات كبيرة للتيارات عند فترات دوام صغيرة لمرورهم. في عدد من الحالات –مثلاً– عند بعض أنواع الجهود الزائدة الداخلية، يمكن أن تمر تيارات ذات فترات دوام مقدارها قليل من الميللي‌ثانية خلال المانعة. لذلك، فمن المعتاد تمييز سعة حمل مانعات الصمام الذاتي بواسطة مقدار تيار ذو شكل مستطيل له فترة دوام 2000 μ sec. وسعة موجة التيار 20/40 μ sec. . ويجب أن تقام المانعات هذه الاضطرابات ليس أقل من 20 مرة. بالنسبة لأقراص فيليت التي قطرها 100 mm، يكون التيار الدفعي للصواعق $I_{perm} = 10\,kA$. كما هو معروف، فإن تيارات الصواعق يمكن أن تصل إلى قيم أكبر. قيود التيارات، المارة خلال المانعة حتى القيمة المسموحة، تتحقق بواسطة خاصية تصميم الاقتراب الواقي للمحطة الفرعية. بالنسبة للموجات التي لها فترة دوام

.2000 µ sec ، يكون تيار قيمته 150 A هو القيمة المقيدة –لذلك– فإن مانعات الصمام–الذاتي لا تستطيع العمل أثناء معظم أنواع الجهود الزائدة الداخلية التي تدوم لعدة فترات من تردد القدرة.

ثغرات-شرر مانعات الصمام-الذاتي Spark-Gaps of Auto-Valve Arrestors

يبدأ تشغيل أي مانعة صمام–ذاتي مع انهيار ثغرات الشرر وينتهي عندما يطفئ قوس التيار التابع في ثغرات الشرر. عند كل من هذه المراحل توضع طلبات على ثغرات الشرر.



الشكل 12.42: وحدة ثغرة شرر في مانعات الصمام الذاتي

تحدد المرحلة الأولى من تشغيل ثغرات الشرر بواسطة خصائص الفولت–ثانية لهم. ويجب أن تكون خصائص الفولت–ثانية ناعمة بدرجة كافية. ويحدد هذا المطلب بشروط حماية عزل المحطة الفرعية، أولاً بواسطة العزل الداخلي للمحولات. ويصبح ممكناً الحصول على خصائص الفولت–ثانية هذه فقط بمساعدة ثغرات شرر متعددة، أي عدد كبير من الثغرات المفردة موصلة على التوالي. الثغرة المفردة نفسها تتكون من إلكترودان من النحاس الأصفر مشكلان بالكبس مفصولان بوردة ميكانيت سمكها 1 mm [الشكل 12.42]. المجال الكهربي بين الإلكترودين يكون قريباً من المجال المنتظم. ومع تأثير الجهد على الثغرة، تنتج شدة مجال كبيرة في طبقة الهواء بين أسطح الإلكترودات ووردة الميكانيت بسبب الفرق في ثوابت العزل الكهربي للهواء والميكانيت ويبدأ تأين بواسطة الإلكترونات الابتدائية لثغرة الشرر بين الإلكترودات. ونتيجة لذلك، تنكسر الثغرة عند معامل دفع قريب من الوحدة أثناء أعشار قليلة من الميكروثانية.

ثغرات الشرر الموصلة توالي تكون ممثلة بشبكة سعوية مماثلة –مثلاً– للشبكة السعوية لسلسلة عوازل. ويوزع الجهد الدفعي بشكل غير منتظم عبر هذه الشبكة والتي تضمن انهيار متعاقب سريع لكل ثغرات المانعة. وبهذا الأسلوب، فإن توليفة التوزيع غير المنتظم عبر الثغرات مع تأين ابتدائي [تنشيط] لثغرة مفردة مع مجال منتظم يضمن معامل دفع منخفض وخصائص الفولت–ثانية المطلوبة لمانعات الصمام–الذاتي.

في مانعات 100 kV وما فوقه يكون عدد الثغرات المفردة كبيراً [96 وأعلى]. الجهد عبرهم يكون موزعاً بشكل غير منتظم جداً مما يعطي معامل دفع أقل من الوحدة. ولكي نحفظ المعامل الدفعي قريباً من الوحدة، فإن المانعات عند هذا الجهد تزود بحلقات حاجبة تحقق تساوي معين للفولت عبر الثغرات. لذلك، فإن مانعات الصمام–الذاتي الواقية من الصواعق تستطيع أن تحد من بعض أنواع الجهود الزائدة الداخلية [تفض موالفتها بسببهم] حيث إن مقاومة التشغيل لها سعة حمل غير كافية لمعظم أنواع الجهود الزائدة الداخلية. ويتم فض الموالفة بواسطة ثغرات الشرر التي لها حد أقل من جهد الانهيار، عند تردد القدرة، تكون ليست أقل من 2.7 مرة من جهد الطور الأكبر. وبالمثل يكون الحد الأعلى لجهد الانهيار عند تردد القدرة قياسياً. هذا الحد يكون الأساس لاختيار جهود اختبار الدقيقة الواحدة لمعدات المحطة–الفرعية.

وسوف نفحص الآن إطفاء قوس التيار التابع بواسطة ثغرات الشرر. من المهم جداً أن يكون التيار التابع متفق في الطور مع جهد التشغيل على المانعة. وهذا يعني أن استعادة الجهد بعد إطفاء التيار التابع [أثناء مروره خلال قيمة الصفر] يحدث عبر جيبي تردد القدرة. عند هذه اللحظة، فإن الانبعاث الإلكتروني الذاتي من الكاثود ينتهي وتستعيد منطقة الثغرة الملامسة معها متانتها الكهربية، وبعد ذلك ترتفع هذه المتانة بدرجة كافية سريعاً. ونتيجة لذلك، تمنع أي ضربات جديدة للقوس في الثغرة. التوزيع المنتظم لجهد الاستعادة عبر الثغرات يلعب دوراً هاماً أثناء ذلك. ويتحقق هذا التوزيع بواسطة توصيل التوازي للثغرات المفردة بمقاومات فعالة ذات قيمة أومية عالية.

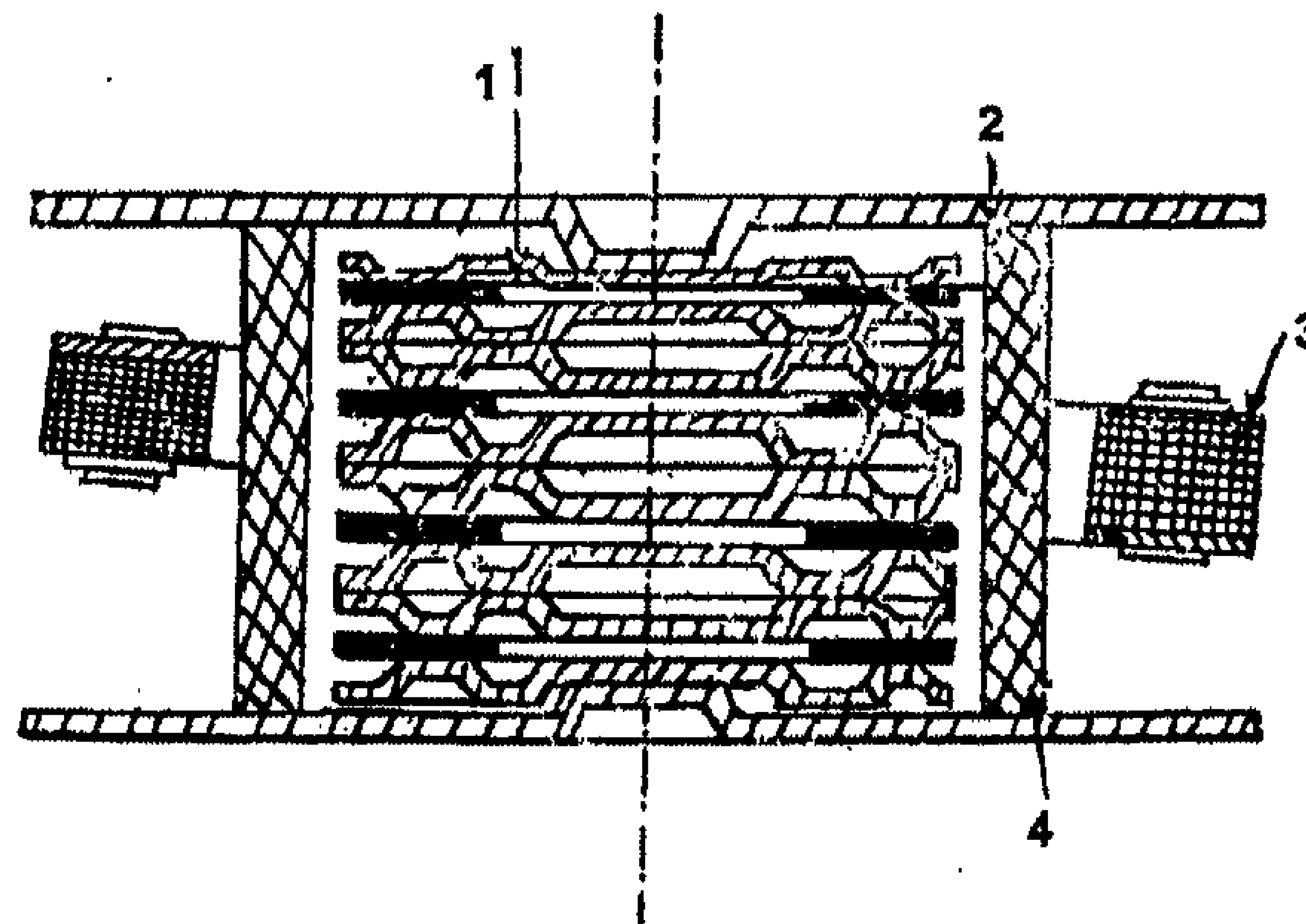
من الواضح أنه، لكل تركيب ثغرات مفردة، توجد قيمة مُحَدِدة للتيار التابع والتي عندها يحدث إطفاء للقوس عند أول مرور للتيار خلال قيمة الصفر. بالنسبة للمانعات طراز PBC، والتي تستخدم فيها الثغرات الموضحة في الشكل 12.42، تكون القيمة المحددة [المقيدة] للتيار التابع هي $I = (80\text{–}100)\ \alpha_{max}$. مقاومة تشغيل المانعة عند جهد الإطفاء يجب أن تحد التيار حتى هذه القيمة.

كلما صغر جهد إطفاء المانعة، صغرت قيمة المقاومة المطلوبة للحد من التيار التابع حتى القيمة المسموحة وصغر عدد أقراص مقاومة التشغيل حسب المعادلة (12.32) وهذا يعني أن الجهد المتخلف أثناء مرور التيار الدفعي خلال تلك المانعة سيكون أكثر انخفاضاً وستحد الجهود الزائدة الجوية إلى قيم أقل.

تركيب وخصائص مانعات الصمام الذاتي PBC، PBBM

Construction & Characteristics of Auto-Valve PBC & PBBM Type Arrestors

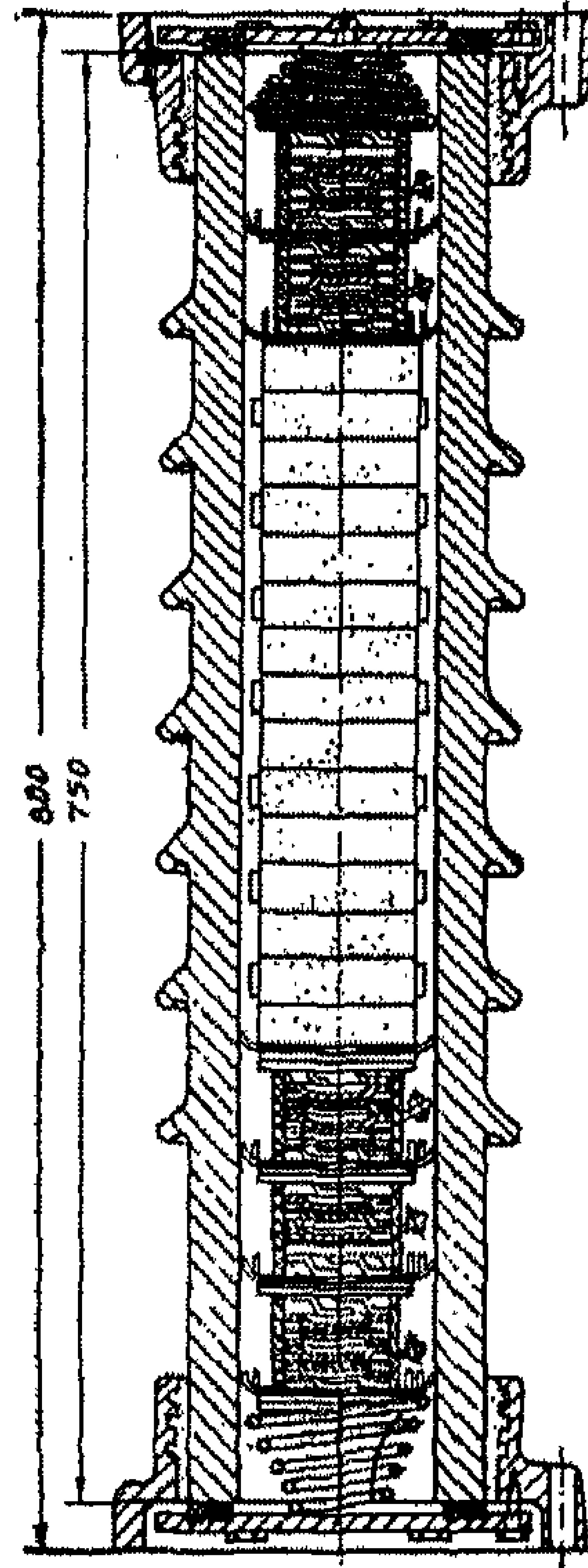
صُنعت سلسلة مانعات فيليت طراز PBC بواسطة AUIE في 1947–1946. في هذه السلسلة، جُمعت مانعات لطبقات عالية من الجهود من العناصر القياسية للجهود المنخفضة: 15 kV، 20 kV، 35 kV . ولسهولة التجميع اشتملت أيضاً العناصر المقابلة لـ 33 kV . ويحتوي كل عنصر من المانعات على ثغرات شرر وأقراص من مقاومة التشغيل. توضع أربع ثغرات شرر منفردة موصلة على التوالي في اسطوانة من البورسلين وتشكل وحدة قياسية من الثغرات. كل من هذه الوحدات من الثغرات الهوائية لها غطاء من البرونز مع تلامسات زنبركية مقطوعة فيهم وتوصل على التوازي بمقاومات كربوراندوم معايرة جيداً تضمن توزيع منتظم لجهد تردد القدرة عبر وحدات ثغرات الشرر [الشكل 12.43].



الشكل 12.43: عنصر قياسي من ثغرة شرر مانعة طراز PBC. (1) وحدة ثغر شرر؛ (2) غطاء نحاس أصفر؛ (3) مقاومة كاربورندوم؛ (4) اسطوانة بورسلين

أقراص مقاومة التشغيل بمساعدة جص سيراميك، تجمع أيضاً في وحدات التلامس بين الأقراص المنفصلة لأي وحدة يتحقق بواسطة معدنه أسطح تلامس الأقراص.

وحدات ثغرات الشرر وأقراص الفيليت توضع في أغطية بورسلين محكمة الغلق. ويكون إحكام الغلق أساسياً لحماية الفيليت من الرطوبة [لأنه يكون غير مضاد للرطوبة وتفسد خصائصه تحت تأثير الرطوبة]، وبالمثل لضمان استقرار خصائص التفريغ لثغرات الشرر. ويوضح الشكل 12.44 أماكن الأقراص وثغرات الشرر في عنصر من PBC-20. وتضغط كل الأجزاء بواسطة يايات مخروطية حلزونية لضمان جودة التلامس.



الشكل 12.44 : مكان ثغرات الشرر وأقراص المقاومة في مانعة طراز PBC-20

تجميع المانعات طراز PBC للجهود الاسمية المختلفة معطى في الجدول 12.6. ويعطي الجدول 12.7 الخصائص الكهربية.

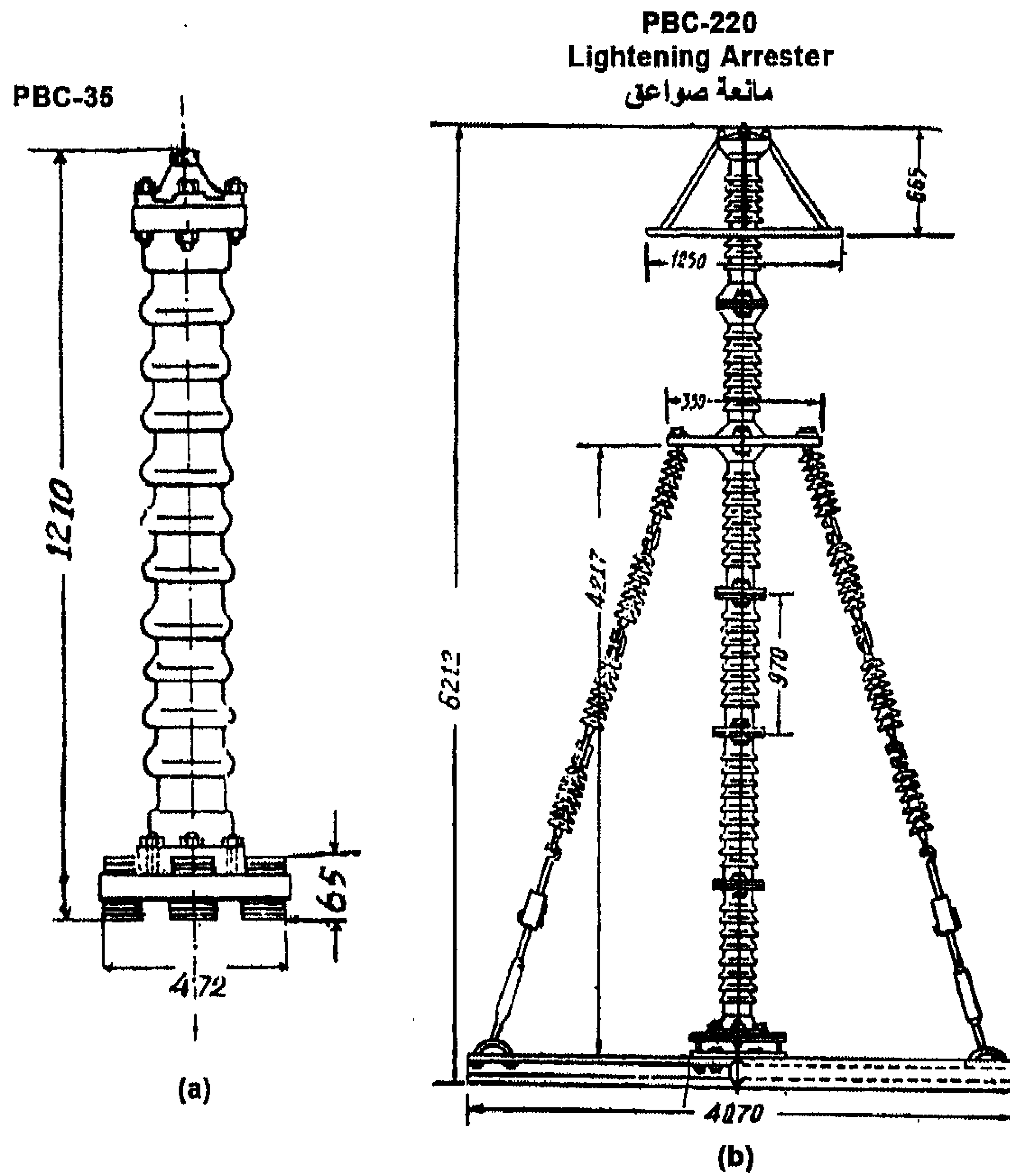
الجدول 12.6 : تجميع مانعات الصواعق طراز PBC

نوع المانعة	الجهد الاسمى (kV)	أقصى فولت مسموح على المانعة (kV)	عدد ونوع العناصر في المانعة	ارتفاع المانعة (mm)	نصف قطر قاعدة المانعة (mm)
PBC-15	15	19	1 × PBC-15	725	236
PBC-20	20	25	1 × PBC-20	885	236
PBC-35	35	40.5	1 × PBC-35	1210	236
PBC-110	110	110	3 × PBC-33	3050	275
PBC-150	150	138	3 × PBC-33+ 2 × PBC-15	4546	1535
PBC-220	220	200	6 × PBC-33	6192	2035

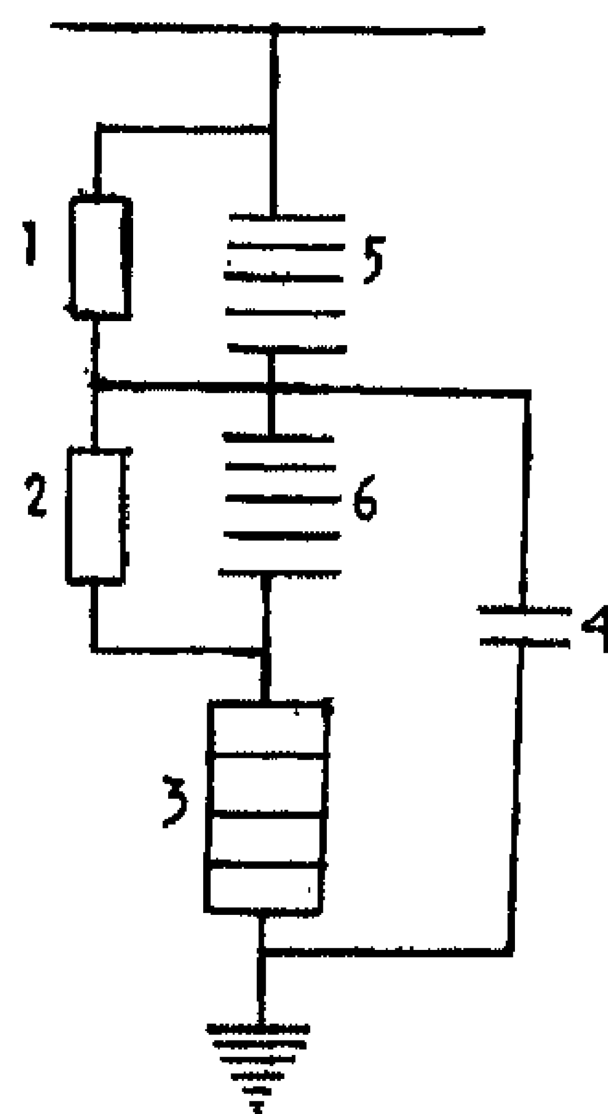
الجدول 12.7: الخصائص الكهربية الرئيسية لمانعات الصمام الذاتي PBC [حسب GOST 8934-58]

الجهد الاسمي للمانعة $(kV_{r.m.s})$	أكبر جهد تشغيل للمانعة (kV)	جهد تردد القدرة تكسر عنده ثغرات المانعة $(kV_{r.m.s})$		الجهد الدفعي الذي تكسر عنده الثغرات [الزمن قبل التفريغ [(1.5–20) µ sec. (kV_{max})	الفولت المتخلف للمانعة لتيار دفعي ذات سعات مختلفة مع طول جبهة موجة 10 µ sec. (kV_{max}) [ليس أكبر من]		
		ليس أقل من	ليس أكبر من		سعة التيار (kA)		
					3	5	10
3	3.8	9	11	20	13.5	14.5	16
6	7.6	16	16	30	25	27	30
10	12.7	26	30.5	45	42	45	50
15	19	38	48	70	57	61	67
20	25	49	60.5	85	75	80	88
35	40.5	78	98	125	122	130	143
110	100	200	250	285	315	335	367
150	138	275	345	375	435	465	510
200	200	400	500	530	630	670	734

في الشكل 12.45 موضح منظر خارجي لمانعات طراز PBC لكل من kV (220–35). المانعة PBC-110 تكون منشأ مدعم ذاتياً من ثلاثة عناصر 33 kV . المانعة PBC-220، تتكون من ستة عناصر 33 kV، وتحفظ في موضع رأسي بمساعدة ثلاث شدادات معزولة. بالنسبة للشدادات تستخدم عوازل تعليق اسطوانية. المانعات 110 kV وما فوقها تزود بحلقات حماية لتساوي توزيع الجهد عبر الثغرات. على أساس مانعات PBC، تم إنتاج مانعات طراز PBBM لحماية الآلات الدوارة عند 3 kV، 6 kV، 10 kV . السمة الخاصة لهذه المانعات هي دوائر التوازي الموصلة على التوازي مع ثغرات الشرر [يتم التزود بدوائر توازي مقاومات أيضاً] كما هو موضح في الشكل 12.46. دوائر التوازي هذه تزيد من عدم انتظام توزيع الجهد عبر جزء من الثغرات وتسبب تخفيض جهد الانهيار الدفعي [النبضي] للمانعة. وينخفض الجهد المتخلف للمانعة باستخدام أقراص مقاومة لها عدم خطية أفضل. الجدول 12.8 يبين الخصائص الكهربية للمانعات طراز PBBM.



الشكل 12.45 : مانعات صمام ذاتي طراز PBC. (a) لـ 35 kV؛ (b) لـ 220 kV



الشكل 12.46 : نظام يضمن تخفيض المعامل الدفعي في مانعات PBBM. (1)، (2) مقاومات توازي؛ (3) أقراص مقاومة تشغيل؛ (4) مكثف توازي؛ (5)، (6) ثغرات شرر

الجدول 12.8 : الخصائص الكهربية الرئيسية لمانعات الصمام الذاتي طراز PBBM لحماية الآلات الدوارة

الجهد الاسمى للمانعة $(kV_{r.m.s})$	أقصى جهد تشغيل للمانعة $(kV_{r.m.s})$ [ليس أقل من]	جهد التفريغ للمانعة: قيمة تردد القدرة $(kV_{r.m.s})$	جهد التفريغ للمانعة: لزمن تفريغ سابق 1.5 µ sec. وأكبر [ليس أكبر من]	الجهد المتخلف للمانعة عند تيار 3 kA $(kV_{r.m.s})$ [ليس أكبر من]
3	3.8	7.5	12	12
6	7.6	15	23	23
10	12.8	24	38	38

مانعات الصمام-الذاتي المغنطيسية The Magneto Auto-Valve Arrestors

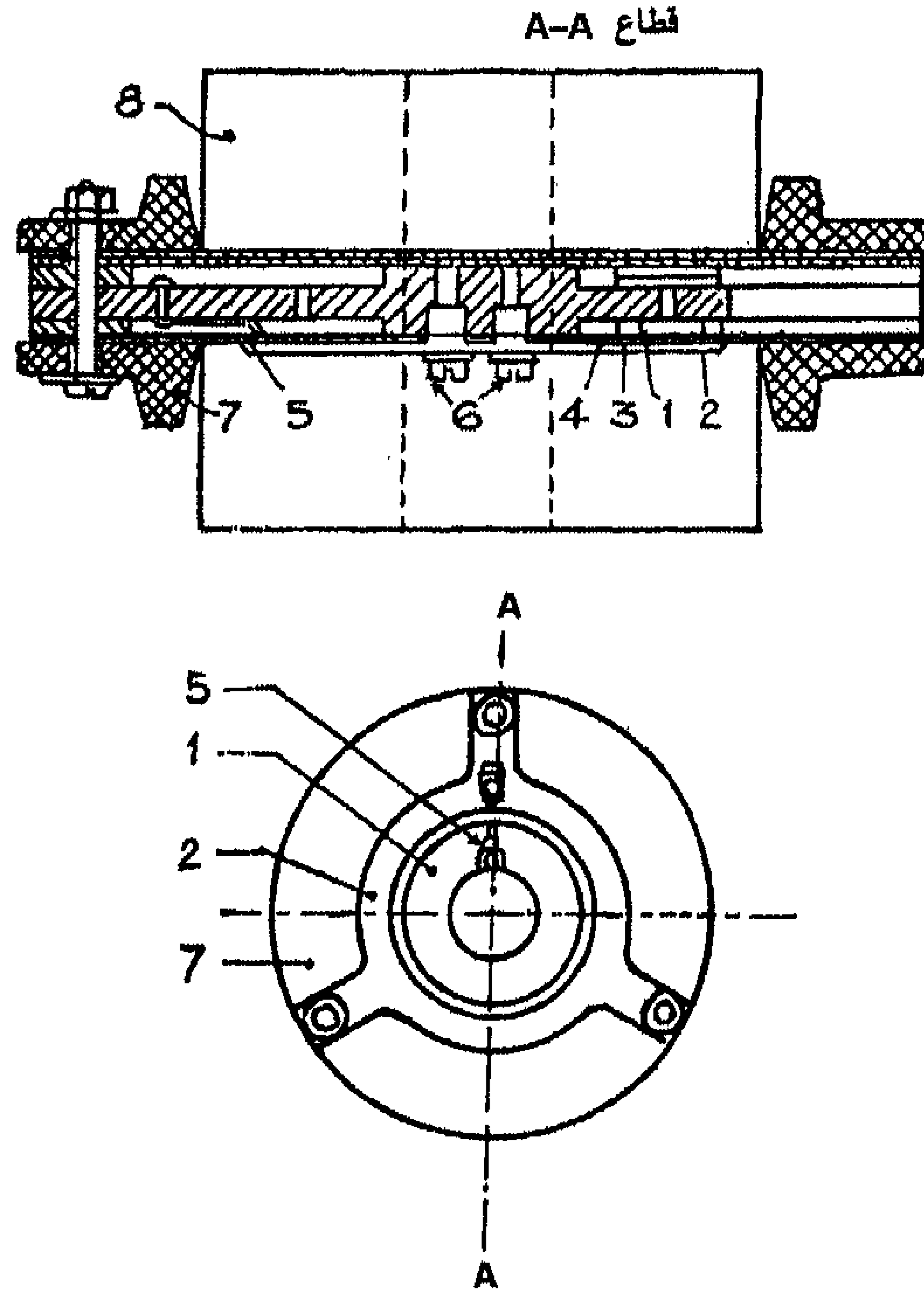
خمد التيار التابع بواسطة ثغرات الشرر الموضحة في الشكل 12.42 يكون معتمداً على الاستعادة الطبيعية للمتانة الكهربية للثغرة بين الإلكترودات الباردة. أثناء ذلك، فإن القيمة المحددة للتيار التابع الذي تستطيع المانعة إخماده تساوي A_{max} (100–80). وإذا زادت القيمة المحددة للتيار التابع، يكون من الممكن تحسين الخصائص الوقائية للمانعات: فمع التيار التابع المتزايد حسب المعادلة (12.32) يكون عدد صغير من أقراص مقاومة التشغيل ضرورياً، وسيكون الجهد المتخلف للمانعة أقل. ومع ذلك، فإن الزيادة في القيمة المحددة للتيار التابع تتطلب زيادة شدة عملية إطفاء القوس في ثغرات الشرر.

وتم إنجاز مثل هذه الزيادة في الشدة في ثغرة تجعل القوس يدور. وهذه الثغرة تم اقتراحها بواسطة قسم الأجهزة الكهربية بمعهد القدرة بموسكو ويتم تنفيذها بواسطة معهد All Union Power. ثغرة الشرر ذات القوس الدوار [الشكل 12.47] هي شقب [مشقبية] slot دائري بين إلكترودين من النحاس متحدا المركز. ويخترق الشقب بواسطة مجال مغنطيسي يخلق بواسطة مغنطيس دائم. ويتم الحصول على تنشيط ثغرة الشرر بواسطة التأين عند مكان تلامس إلكترود خاص مع حشو العازل الكهربي.

القوس الناتج بسبب انهيار تلك الثغرة يبدأ الدوران بسرعة كبيرة عبر الشقب الدائري تحت تأثير المجال المغنطيسي، وهكذا يُبرد. وعندما يتقطع القوس في تلك الثغرة، فإن متانتها الكهربية تزداد أسرع مما هو في الثغرة العادية التي يكون فيها القوس ساكناً. وكنتيجة، يمكن إطفاء تيارات تابعة أكبر في ثغرة الشرر ذات القوس الدوار.

وتشكل ثغرات شرر القوس الدوار أساس مانعات الصمام الذاتي المغنطيسية طراز PBMΓ

حتى 500 kV، والمطور بواسطة AUIE في 1957–1958. التيار التابع لهذا النوع من المانعات يساوي 250 A عند جهد الإطفاء. وتتكون وحدة ثغرة الشرر من أربع ثغرات شرر مفردة منفصلة وموصة توازي بمقاومة غير–خطية. تصنع مقاومة تشغيل المانعة من أقراص فيليت. استخدام أقراص قطرها 150 mm يسمح بزيادة سعة الحمل لها إلى الضعف مقارنة مع تلك الخاصة بمانعات الطراز PBC.



الشكل 12.47: تركيب ثغرة الشرر ذو القوس الدوار. (1) إلكترود داخلي؛ (2) إلكترود خارجي؛ (3) حشو برسبان؛ (4) حشو ميكانيت؛ (5) إلكترود تنشيط؛ (6) مسمار لولبي؛ (7) حلقة بلاستيك؛ (8) مغنطيس دائم

سعة حمل موجة التيار المستطيلة التي طولها 2000 µ sec. هي 400 A . تحدث هذه القيمة والدوام لتيارات الجهود الزائدة الداخلية في المانعات حتى 220 kV . وبالتالي، فإن مانعات الصمام الذاتي المغنطيسية لـ 220 kV تكون قادرة على التحديد، بغض النظر عن الجهود الزائدة الجوية، ومعظم الجهود الزائدة الداخلية أيضاً. عند 300 kV، 500 kV تكون سعات الحمل الأعلى أساسية ولذلك فإنها تستطيع الحد من الجهود الزائدة الداخلية.

مانعة الصمام–الذاتي المغنطيسية لـ 500 kV (PBMΓ-500) تتكون من 12 عنصر قياسي.

وترتب العناصر بطول مسمار لولبي على ثلاث أعمدة دعم لعوازل KC-400. المانعة مزودة بحلقة حماية لتساوي توزيع الجهد تحت النبضات. وتركب هذه المانعات قريبة من المحولات الذاتية auto transformers في خطوط النقل.

١٢-٨ حماية خطوط النقل من الجهود الزائدة الجوية

Over-Voltage Protection of Transmission Lines

١٢-٨-١ الخصائص العامة للجهود الزائدة الجوية على خطوط النقل

General Characteristics of Atmospheric Over-Voltages on Transmission Lines

خطوط النقل هي العناصر الأكثر طولاً في أنظمة القدرة، وبالتالي فهي الأكثر تعرضاً للجهود الزائدة الجوية. فالجهود الزائدة الناتجة على الخطوط لا تسبب فقط قفزات وميض عزل الخط، بل أيضاً تصل إلى المحطات الفرعية على هيئة موجات راحلة وهي أحد الأسباب الممكنة لتدمير عزل المحطة الفرعية. لذلك، فإن الإجراءات المتخذة لحماية خطوط النقل يجب أن تنفذ فقط بعد الأخذ في الاختبار كيفية تأثيرها على شروط عمل عزل المحطة الفرعية. ومن وجهة النظر هذه، يجب الاهتمام جيداً بالوقاية ضد الصواعق لقطاعات الخطوط التي تكون قريبة من المحطات الفرعية، وغالباً ما تسمى approaches.

الجهود الزائدة الجوية على الخطوط تكون نتيجة ضربات الصواعق المباشرة على الخطوط [الجهود الزائدة بسبب ضربات الصاعقة المباشرة] وأيضاً نتيجة ضربات الصواعق في جوار الخطوط [الجهود الزائدة المستحثة]. وحيث في الحالة الأولى، تُبدد كل طاقة تفريغ الصاعقة في الخط وفي الحالة الثانية جزء منها فقط، فإنه يمكن التنبؤ بأن الجهود الزائدة بسبب الضربات المباشرة أكثر خطورة لعزل الخط.

في الوقت الزاهن من غير المعقول اقتصادياً خلق خطوط نقل مقاومة للصواعق على المطلق بحيث يستحيل اقتطاعها تحت تأثير الجهود الزائدة الجوية. لذلك فإن المشكلة الأساسية لوقاية خطوط النقل من الصواعق ليست المنع الكامل للتقطعات بل هي تخفيض عدد تقطعات الصواعق إلى حد معقول فقط. أثناء تحليل الجهود الزائدة، يكون تحديد الجهود القصوى الممكنة المطلقة على عزل الخط ليس ذو أهمية كبيرة ولكن تحديد عدد الحالات في سنة واحدة والتي يتعدى فيها هذا الجهد المتانة الدفعية impulse strength لعزل الخط هو القيمة الأساسية. ومن الواضح أن عدد تلك الجهود الزائدة يُحدد –قبل كل شيء– بواسطة العدد الإجمالي لضربات الصواعق على خطوط النقل كل سنة [للجهود الزائدة نتيجة الضربات المباشرة] أو لضربات

الأرض في جوار الخط [للجهود الزائدة المستحثة].

من البند رقم ١٢–٥ نرى أن خط النقل، الذي فيه متوسط ارتفاع تعليق الموصل الأعلى أو السلك الأرضي هو h ، يجمع تفريغات صواعق من قطاع من سطح الأرض له عرض في حدود $6h$ وطول يساوي طول الخط. من جهة أخرى، في المتوسط يحدث يومياً عدد من تفريغات الصواعق يساوي (0.15–0.10) على كل كيلومتر مربع من سطح الأرض. وبأخذ ذلك في الاعتبار، يفترض عادة أن العدد الكلي من ضربات الصواعق على خط نقل طوله L يساوي:

$$N = (0.6 - 0.9)h \times 10^{-3} \cdot L\, n_d \qquad (33.12)$$

حيث n_d = عدد أيام الصواعق في سنة واحدة.

L = طول الخط (km).

h = ارتفاع تعليق الموصل الأعلى (m).

وأوصت المواصفات القياسية للوقاية من الجهود الزائدة المنشورة عام 1954 أنه يجب استخدام القيمة الأعلى لثابت المعادلة (12.32). ففي كل الاحتمالات تكون هذه القيمة مرتفعة قليلاً –ومع ذلك– سنستخدمها في المستقبل، متذكرين أنها تعطي الحد العلوي لعدد ضربات الصواعق على خطوط النقل.

تفريغات الصواعق على أي خط نقل يمكن أن تكون ذات شدات مختلفة، تحدد قبل كل شيء، بواسطة سعة تيار الصاعقة I_M ومعدل تزايده مع الزمن [شدة الانحدار a]. ويعتمد الجهد على عزل خط النقل –كما سنرى– على كلاً من هذين البارامترين الهامين لتفريغات الصواعق (I_M ، a). ومع ذلك –ففي بعض الحالات– يكون أحدهما فقط ذات أهمية ابتدائية. قفزات وميض [شرر] عزل الخط أثناء ضربة الصاعقة المباشرة ستحدث عند تلك التوليفات من I_M ، a لتيار الصاعقة الذي عندها يتعدى الجهد المتانة الدفعية للعزل على الخط. وحيث إن كل تفريغات الصواعق الحادثة على أي خط لا تحقق هذا المطلب، فإن شرر الخط لا يحدث لكل تفريغات الصواعق. وإذا مثلنا احتمال شرر العزل أثناء ضربة الصاعقة بـ v_{fl}، نحصل على العدد الكلي لقفزات الوميض [الشرر] N_{flash} في سنة واحدة كالآتي

$$N_{flash} = 0.9\, h\, L\, n_d\, v_{fl} \times 10^{-3} \qquad (34.12)$$

ولن يكون صحيحاً أن نفترض أن عدد تقطعات الصاعقة لخط في سنة يجب أن يساوي عدد

قفزات الوميض الدفعية لعزله. فعلياً، زمن عمل وقاية المرّحل لا يكون أبداً أقل من نصف دورة تردد القدرة –أي 0.01 sec. ≮– زمن تواجد الجهود الزائدة على خط له قيمة حوالي 100 µ sec. . وبالتالي فإن قفزة الوميض الدفعية نفسها لا تستطيع أن تسبب تقطع الخط الذي سيحدث فقط إذا كانت الشرارة الدفعية تتغير إلى تفريغ القوس المداوم بواسطة جهد تشغيل الخط.

احتمال تحوّل الشرر الدفعي إلى قوس قدرة يعتمد على عدد من العوامل تشمل قدرة المصدر. ومع ذلك فإن من المهم جداً شدة المجال الناشئ بواسطة جهد التشغيل في قناة التفريغ الدفعي. وكلما زادت قيمة هذه الشدة تحسنت شروط مداومة موصلية القناة وتحول تفريغ الشرارة إلى تفريغ قوسي. وإذا كان تدرج جهد التشغيل بطول مسار الشرر غير مقبول، فإن قوس القدرة يمكن أن لا يتكون إطلاقاً، وبالتالي لن يحدث تقطع للخط.

أما مسألة احتمال تحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة فقد أعيد دراستها عملياً في الاتحاد السوفيتي وفي أماكن أخرى. وتمت معظم الأبحاث في AUSRIE وخلصت نتائج الأبحاث إلى اعتماد احتمال تحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة η على تدرج جهد التشغيل عبر مسار الشرر، المعطى في الجدول 12.9.

الجدول 12.9: احتمال تحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة

$E_{op}=\frac{v_{op}}{l_{fe}}(\mathbf{kV}_{r.m.s}/\mathbf{m})$	50	30	20	10
η	0.6	0.45	0.25	0.1

وحيث إن الكمية η تحدد كسر كل قفزات شرر العزل التي تسبب التقطعات، فإن العدد الكلي لتقطعات الصاعقة لخط في السنة يساوي:

$$N_{int}=0.9h\times10^{-3}L\,n_d\,v_{fe}\cdot\eta \tag{35.12}$$

لمقارنة جودة مقاومة الصواعق فإن خطوط النقل ذات الأطوال المختلفة المقامة في مناطق ذات شدة مختلفة لنشاط الصواعق، العدد النوعي للتقطعات، أي عدد تقطعات خط طوله 100 km في منطقة لها $n_d=20$ يوم صواعق في السنة، يتم تحديده. والعدد النوعي للتقطعات يكون:

$$n=1.8hv_{fl}\,\eta \tag{36.12}$$

من المعادلة (12.36) يتضح إمكانية وجود طريقتان مختلفتان للحماية من الصواعق للخطوط متعلقة بتخفيض كل من v_{fl} ، η.

تخفيض احتمال شرر العزل v_{fl} يتحقق أساساً بالتزود بأسلاك تأريض على الخطوط تمنع الضرب المباشر لموصلات القدرة. فعندما يحدث تفريغ الصواعق إلى السلك الأرضي، يمكن أن يحدث شرر عزل الخط فقط إذا كان التفريغ شديد جداً، واحتمال التفريغ بهذه الشدة ليس كبيراً جداً، وبسبب ذلك فإن عدد قفزات شرر العزل في السنة تصبح صغيرة جداً. أما تخفيض احتمال تحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة η فإنه يتحقق بزيادة مسار الشرر –أساساً– باستخدام دعائم خشبية. في الخطوط ذات الدعائم الخشبية يكون تدرج جهد التشغيل E_{op} له قيمة في حدود $(0.1\text{–}0.2)\ \text{kV/m}$ ، وعلى ذلك فإن $(10\text{–}20)\%$ فقط من كل شرر العزل يسبب قطع الخط.

١٢-٨-٢ الجهود الزائدة المستحثة على خطوط النقل

Induced Over-voltage on Transmission Lines

أثناء ضرب الصاعقة للأرض القريبة من خط النقل، تحدث في الموصلات ظاهرة عابرة [عارضة] بسبب المجال الكهرومغنطيسي لقناة الصاعقة. ونتيجة لذلك، لا تخلق فقط جهود زائدة على الخط –ناتجة بالتأثير الكهرومغنطيسي للمجال المغنطيسي– ولكن تتكون أيضاً موجات راحلة تتحرك على كلا من جانبي الخط من مكان الضربة.

ويمكن أن تبدأ الظاهرة العابرة فقط تحت تأثير قوة تُجبر الشحنات على الانتقال بطول الخط، أي تحت تأثير مركبة متجه شدة المجال المتجهة في اتجاه مسار الخط. وحيث إن متجه المركبة المغنطيسية لشدة المجال الكهربي تكون متجهة رأسياً إلى أعلى، فإنها لا تستطيع إحداث الظاهرة العابرة transient phenomenon في الخط –والتي– بالتالي– تكون مرتبطة فقط بالمجال الكهربي الخارجي.

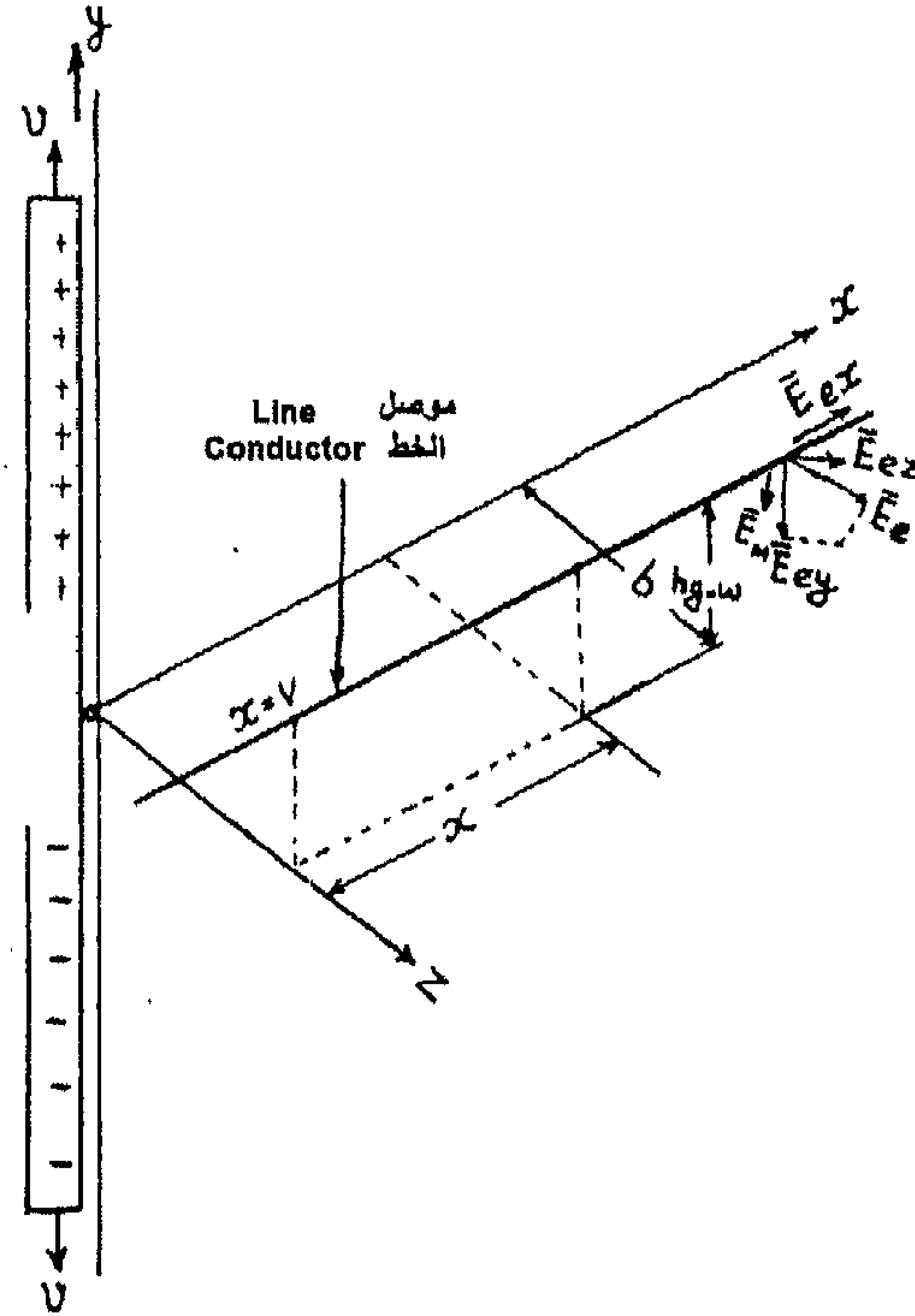
إذا كان خط النقل موجهاً موازياً للمحور– x لنظام إحداثيات كارتيزي، نقطة الأصل له موجودة في مكان تلامس قناة الصاعقة مع الأرض كما هو موضح في الشكل 12.48، فإن الظاهرة العابرة تحدد حينئذ بالمعادلة التالية:

$$\frac{\partial^2 v_e}{\partial x^2} - \frac{1}{C^2}\frac{\partial^2 v_e}{\partial t^2} = \frac{\partial E_{ex}}{\partial x} \qquad (37.12)$$

حيث E_{ex} = مسقط المركبة الكهربية لشدة المجال الكهربي على المحور– x .

v_e= الجهد بالنسبة للأرض الناتج بواسطة الشحنات الذاتية للخط.

وتنقل الشحنات على هيئة موجات راحلة تحت تأثير القوة الخارجية.



الشكل 12.48: حساب الجهود الزائدة المستحثة في حالة ضربه للأرض

ويحسب الجهد المحصل عند أي نقطة من الخط بالنسبة للأرض $v_i(x, t)$ بواسطة مجموع الجهود الناتجة بواسطة المجال الخارجي والشحنات الذاتية للموصل.

$$v_i(x, t) = \phi(x, t) + v_e(x, t) + \int \overline{E}_{ym}(x, t)\overline{dl} \qquad (38.12)$$

في المعادلة السابقة $\phi(x, t)$ هو الجهد القياسي [غير الموجه] للمجال الخارجي عند النقطة المأخوذة في الاعتبار عند اللحظة الزمنية t. وبالتالي، فإن مجموع الحدين الأولين يُحدد بواسطة المجال الخارجي و–في المستقبل– سنسميها المركبة الكهربية للجهد المستحث.

الحد الثالث للمعادلة (12.38) والذي يحدد بالمجال المغنطيسي الخارجي، سنسميه المركبة المغنطيسية للجهد المستحث. وحيث إن المجال المغنطيسي يكون مجالاً جيبياً، فإن الجهد المستحث بواسطة هذا المجال، يعتمد على مسار التكامل. إذن الجهود بين أحد النقط

ونفس النقط، والمقاسة عبر مسارات مختلفة يمكن أن تختلف كثيراً عن بعضها. ويجب تذكر ذلك دائماً.

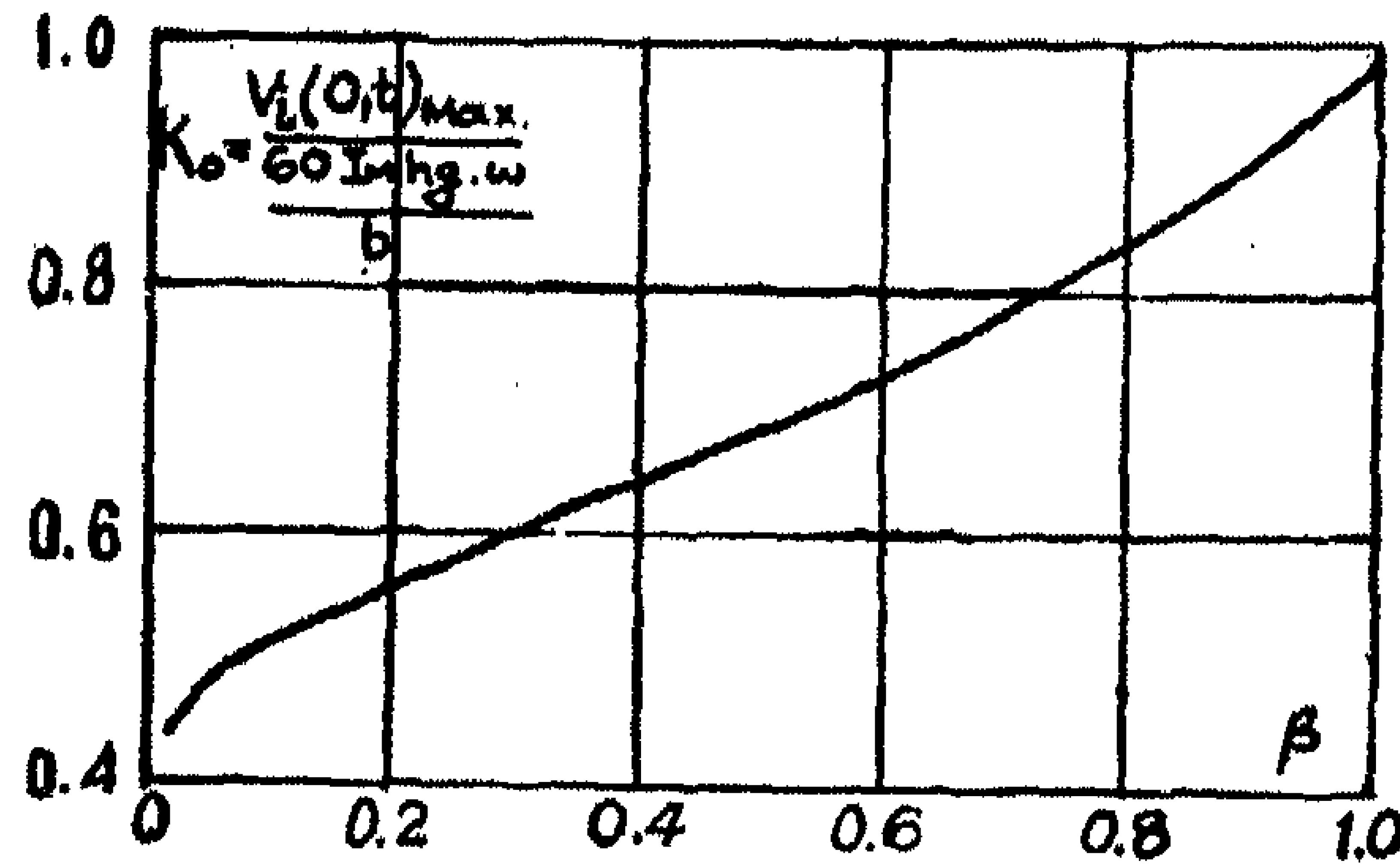
وهكذا، فإن الجهد المستحث على خطوط النقل يمكن أن يمثل على هيئة مجموع مركبتان:

$$v_i(x,t) = v_{i.e.}(x,t) + v_{i.m.}(x,t) \quad (39.12)$$

حيث:

$$v_{i.e.}(x,t) = \phi(x,t) + v_e(x,t) \quad (40.12)$$

$$v_{i.m.}(x,t) = \int \overline{E}_{ym}(x,t)\,\overline{dl} \quad (41.12)$$



الشكل 12.49 : اعتماد المعامل K_0 على سرعة ضربة الرجوع $\beta = (v/c)$

وبدون الدخول في تفاصيل حسابات الجهد المستحث وهو خارج نطاق هذا الكتاب، سنشير إلى أن سعة الجهد على عزل الخط عند نقطة قريبة من مكان تفريغ الصاعقة يمكن أن يحدد من العلاقة التالية:

$$v_{i_{max}} = K_0 \frac{60 I_m h}{b} \quad (42.12)$$

حيث $h =$ متوسط ارتفاع موصل التعليق (m).

$b =$ المسافة من الخط حتى مكان تفريغ الصاعقة (m).

$K_0 =$ معامل يعتمد على سرعة التفريغ الرئيسي [الشكل 12.49].

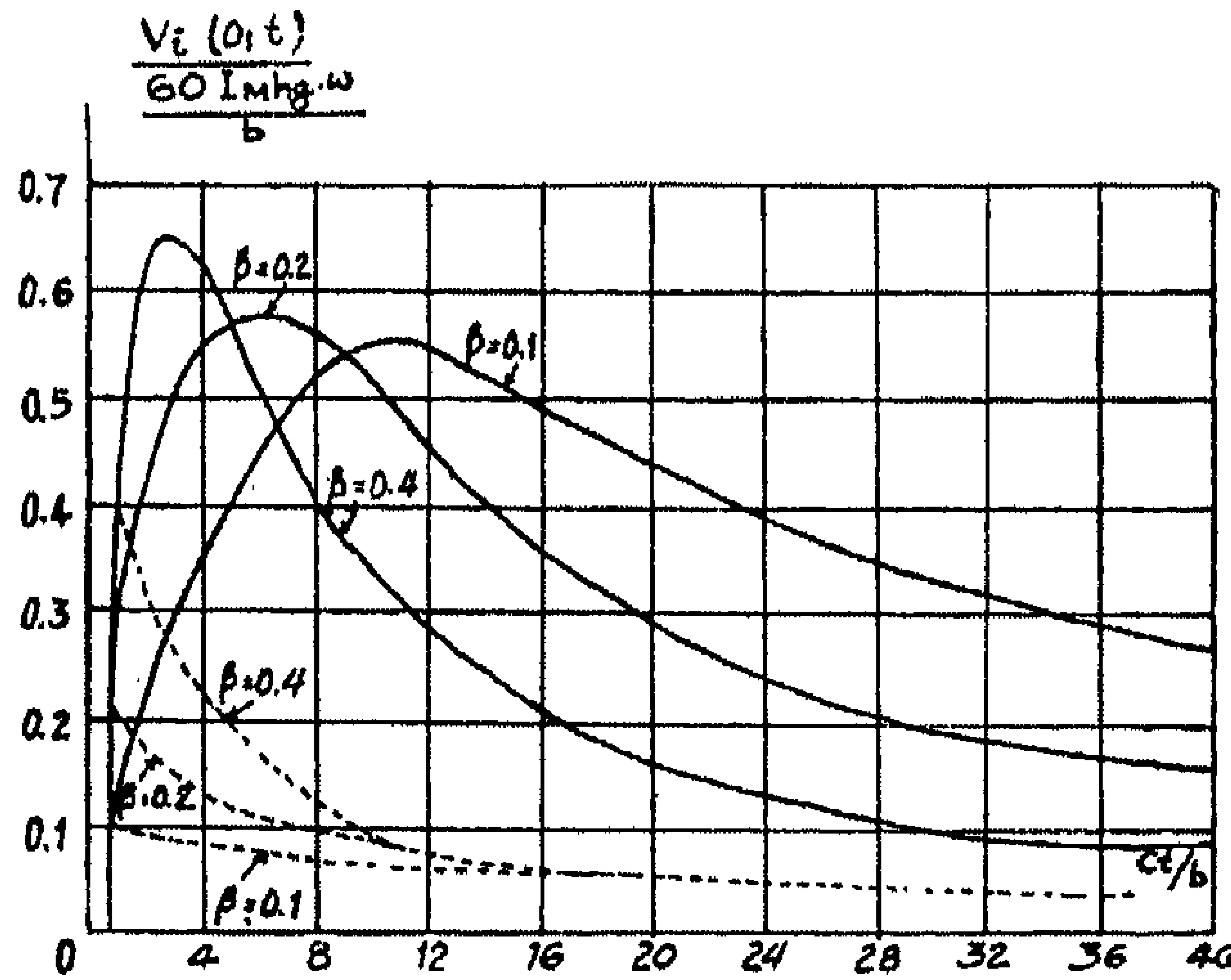
منحنيات تغير الجهد على خط عند نقطة قريبة من مكان تفريغ الصاعقة موضحة في الشكل 12.50 حيث المركبات الكهربية والمغنطيسية تكون موضحة منفصلة.

المركبة المغنطيسية تزداد بزيادة سرعة التفريغ الرئيسي، حيث إن سرعة تغير المجال

المغنطيسي تزداد مع الزمن. المركبة الكهربية، من جهة أخرى تزداد قليلاً، حيث إنه عند تيار غير متغير $I_M = \sigma v$ تكون زيادة السرعة مرتبطة مع انخفاض σ وضعف المجال الكهربي. الجهد المستحث المحصل، كما هو موضح في الشكل 12.49، يزداد بزيادة سرعة التفريغ الرئيسي. حيث إن معظم التفريغات الرئيسية لها سرعة في حدود (0.2–0.1) من سرعة الضوء C فإن المعامل K_0 يكون حوالي 0.5 ومن الممكن تقدير سعة الجهد المستحث تقريباً من العلاقة:

$$v_{im} = 30\frac{I_M\ h}{b} \qquad (43.12)$$

وهي قابلة للتطبيق عند نقط بعيدة عن مكان التفريغ أيضاً.



الشكل 12.50: الجهد المستحث عند نقطة قريبة من مكان الضربة لسرعات مختلفة من ضربات الرجوع ($\beta = v/c$). الخطوط المنقطة تمثل المركبة المغنطيسية، والخطوط المستمرة تمثل الجهد الكلي

من المعادلة (12.43)، نرى أنه مثلاً، أثناء ضربة صاعقة لها تيار 100 kA عند مسافة $b = 50$ m من الخط، فإن الجهد على موصل معلق على ارتفاع $h = 10$ m فوق سطح الأرض، سيكون له مقدار في حدود 600 kV ومع تزايد ارتفاع تعليق الموصل وزيادة تيار الصاعقة، فإن الجهد المستحث يمكن أن يزداد أكثر. المعادلة (12.43) تكون قابلة للتطبيق في أبسط حالة فقط وهي موجة تيار الصاعقة المستطيلة. مع معدل محدود لارتفاع تيار الصاعقة على جبهته، فإن معدل تغير المجال المغنطيسي للقناة يتناقص مما يسبب نقص صغير في الجهود الزائدة المستحثة. ومع ذلك، فإن هذا النقص يكون محسوساً فقط عند الضربات القريبة عندما $b < v v_f$.

الاهتمام الأساسي ليس تحديد القيم الأكبر الممكنة للجهود الزائدة المستحثة ولكن احتمال إنتاج جهود زائدة ذات سعات مختلفة.

ولكن نحدد احتمال إنتاج جهد مستحث ذات سعة تتعدى قيمة معينة ν_i، سنعتبر شريط ضيق من الأرض له عرض db ، عند مسافة b من محور الخط. ولطول مقداره 100 km من الخط، فإن العدد الإجمالي من الضربات لهذا الشريط سيساوي حوالي $15n_d\, db$.

ولكي يكون أثناء ضربة الصاعقة في هذا الشريط، أن يتعدى الجهد المستحث V_i فإن سعة تيار الصاعقة على أساس المعادلة (12.43) يجب أن تكون:

$$I_M \geq \frac{V_i}{30h} \cdot b$$

ولكن احتمال هذه التيارات يساوي:

$$\nu_I = e^{-\frac{I_M}{26.1}} = e^{-\frac{V_i}{780h} b}$$

وبالتالي، فإن عدد الضربات في شريط db ، الذي يؤدي إلى ظهور الجهد $V \geq V_i$ يكون:

$$dN = 15 n_d\, e^{-\frac{V_i}{780h} b}\, db$$

ومن الواضح الآن، أنه يكون أساسياً اعتبار الضربات التي يمكن أن تحدث في كل شرائط الأرض على كلا من جانبي الخط، أي تكامل المعادلة الأخيرة من b_{min} إلى ∞ كالآتي:

$$N = 2\int_{b_{min}}^{\infty} dN = 30 n_d \int_{b_{min}}^{\infty} e^{-\frac{V_i}{780h} b}\, db$$

وحيث إننا اعتبرنا سابقاً أن خط النقل يجمع كل ضربات الصاعقة من شريط من الأرض عرضه $6h$ ، وأدنى مسافة من مكان الضربة إلى الأرض حتى الخط يجب أن تؤخذ $b_{min} = 3h$.

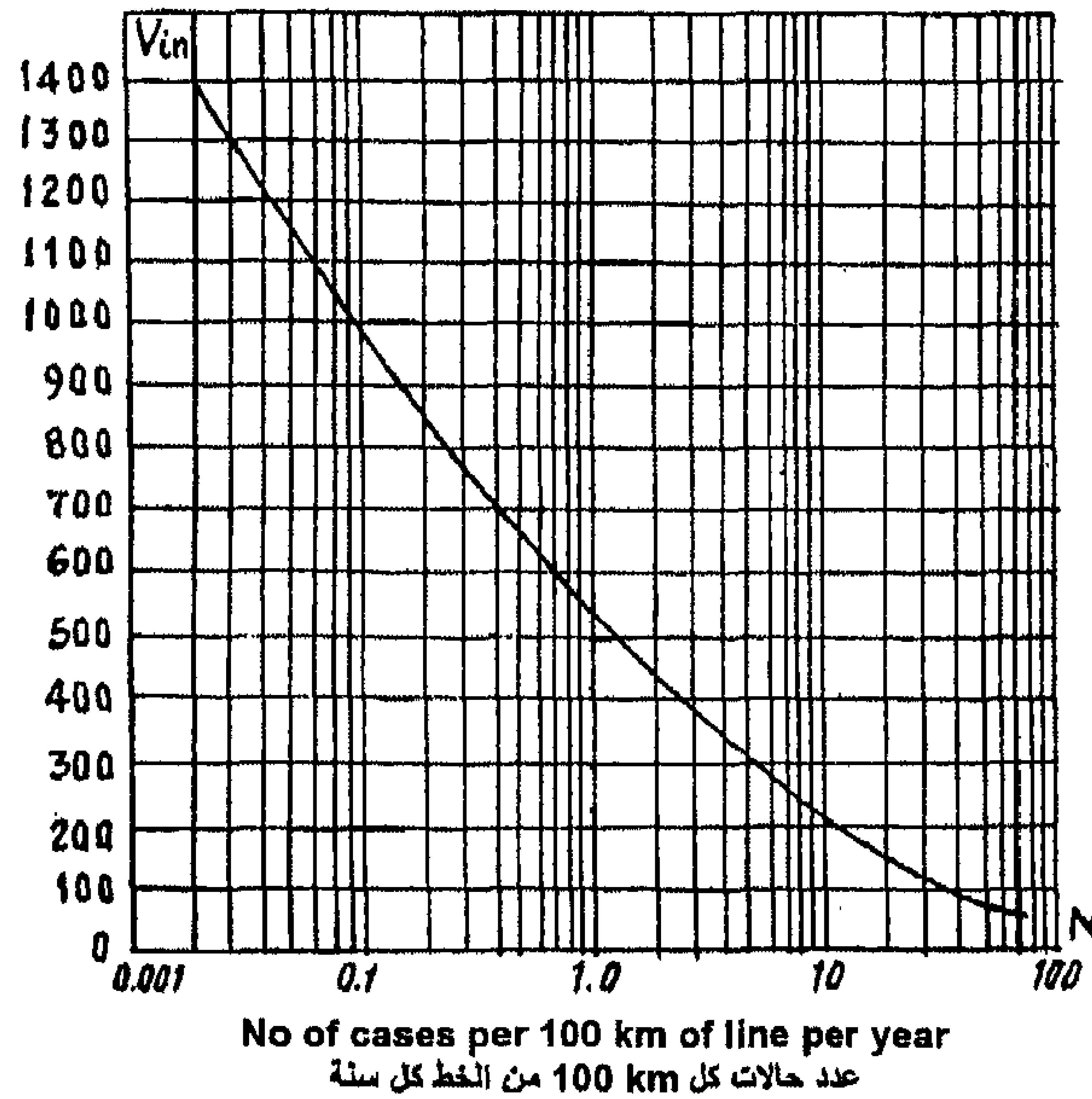
في هذه الحالة عند $n_d = 20$ فإن التكامل يعطى كالآتي:

$$N = \frac{4700}{V_i} e^{-\frac{V_i}{260}} \qquad (44.12)$$

حيث يُعبر عن V_i بـ(kV).

وعلى أساس المعادلة (12.44) فإن منحنى احتمال إنتاج جهود مستحثة ذات سعات مختلفة موضح في الشكل 12.51. وكما نرى، فإن الجهود الزائدة يمكن أن تتعدى المتانة الدفعية

impulse strength، ولعزل خط 35 kV $(V_{50\%} = 350\ \text{kV})$ 2.3 مرة في السنة والمتانة الدفعية لعزل خط 110 kV $(V_{50\%} = 700\ \text{kV})$ 3 مرة في 10 سنوات. وكما سنرى لاحقاً، فإن احتمال شرر العزل تحت ضربات صواعق مباشرة يمكن أن يكون أكبر، ومن هنا فإن الجهود المستحثة يمكن أن تكون أخطر في خطوط الجهد المنخفض kV (10–3) فقط.



الشكل 12.51: احتمالات إنتاج جهود مستحثة ذات سعات مختلفة

١٢-٨-٣ ضربات الصواعق المباشرة في خط بدون أسلاك أرضية

Direct Stroke of Lightning in a Line without Ground Wires

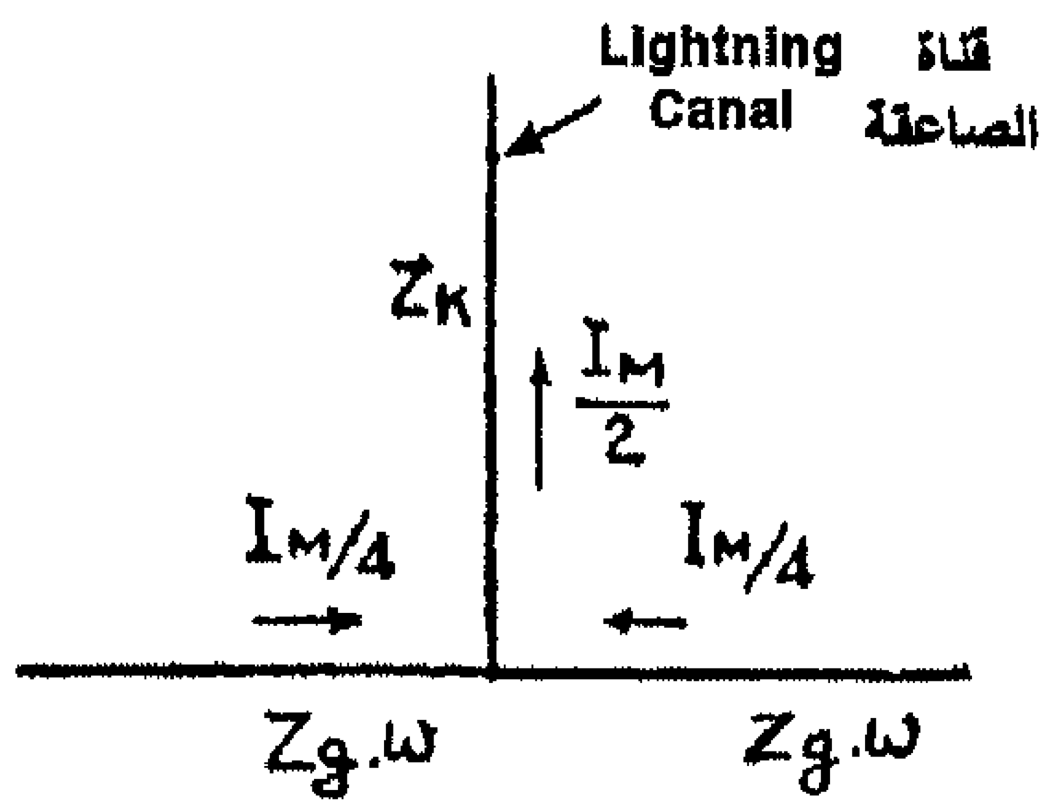
أشرنا فيما سبق أن أحد الوسائل الممكنة لحماية الخطوط من الصواعق هي استخدام أسلاك أرضية تأخذ على عاتقها الغالبية العظمى من كل تفريغات الصواعق. وبالرغم من ذلك، فإن استخدام الأسلاك الأرضية يكون غير مرغوب على كل الخطوط، وعملياً فإن عدد كبير من الخطوط التي ليس لها وقاية سلك أرضي، تكون موجودة.

في الخطوط التي بدون أسلاك أرضية، يضرب العدد الأكبر من تفريغات الصواعق موصل خط، ويحدث تفريغ الصواعق مباشرة إلى برج نادراً وهي تهمل غالباً. أثناء الضرب المباشر لموصل، توصيل معاوقة impedance تساوي نصف معاوقة تمور الموصل $Z_{con}/2$ عند مكان الضربة [بسبب التوصيل المتوازي لمعاوقات تمور الموصل يمين ويسار مكان الضربة]. وحيث إن

معاوقة تمور موصلات الخطوط الهوائية [العلوية] تقع في حدود Ω (400–500) ، فيجب أن نتوقع خفض محسوس في التيار عند مكان الضربة، مقارنة مع تيار الصاعقة. إذا استخدمنا العلاقة المبسطة :

$$I = I_M \frac{Z_k}{Z_k + \frac{Z_{con}}{2}}$$

وأخذنا $Z_k \approx Z_{con}/2 \approx 200\ \Omega$ ، فمن الممكن أن نستنتج أنه في حالة ضربه للموصل، فإن التيار عند مكان الضربة سيكون مساوياً $I_M/2$ أي نصف تيار الصاعقة المقاس في الهدف جيد التأريض. وبالتالي فعلى كل من جانبي مكان الضربة ستنتشر موجة مع تيار $I_M/4$ [الشكل 12.52] وتنتج جهد على الموصل :



الشكل 12.52: توزيع التيارات في حالة ضربة الصاعقة على موصل

$$V_{con} = \frac{I_M}{4} Z_{con} \approx 100 I_M \qquad (45.12)$$

ولتحديد احتمال شرر العزل، يكون أساسياً مقارنة هذا الجهد مع المتانة الدفعية بطول كل المسارات الممكنة لشرر عزل الخط. من هنا، فإن الخطوط التي تكون على دعائم معدنية أو خشبية تختلف كثيراً عن بعضها، ومن ذلك سندرسها كل على حدة.

خطوط الدعائم المعدنية — The Line on Metallic Supports

مع ضربة صاعقة في موصلات خط على دعائم معدنية، فإن كل جهد الموصل يؤثر على سلسلة العزل، وسيحدث الشرر الخاص بها عند تحقق الشرط:

$$V_{con} = 100 I_M \geq V_{50\%}$$

حيث $V_{50\%}$= جهد الشرر الدفعي الأدنى للسلسلة.

وهذا الشرط يقابل تيار الصاعقة :

$$I_M = I_p = \frac{V_{50\%}}{100} \qquad (46.12)$$

وهو يسمى غالباً "المستوى الواقي للخط". وكما نرى، في الحالة تحت الاعتبار، فإن شرر عزل الخط يُحكم ببارامتر واحد فقط للصاعقة –سعة التيار– ولا يعتمد عملياً على انحداره. وحيث إن كل تفريغات الصواعق مع تيار I بحيث $I \geq I_p$ تسبب شرر عزل الخط، فإن احتمال شرر العزل v_{fl} يساوي احتمال التيار I_p وبالتالي، يمكن أن يُحدد حسب منحنى الشكل 12.3 أو المعادلة (12.3).

فمثلاً، بالنسبة لخط 110 kV، أثناء ضربه للموصل، عندما يكون الجهد على الموصل في غالبية عظمى من الحالات سالب، وطبقاً للجدول 6.1، $v_{50\%} \approx 645$ kV، وبالتالي فإن $I_p = 6.5$ kV، $V_{fl} = 0.8$. وحيث إن سلسلة العوازل لـ 110 kV لها طول في حدود 1.2 m فإن تدرج جهد التشغيل:

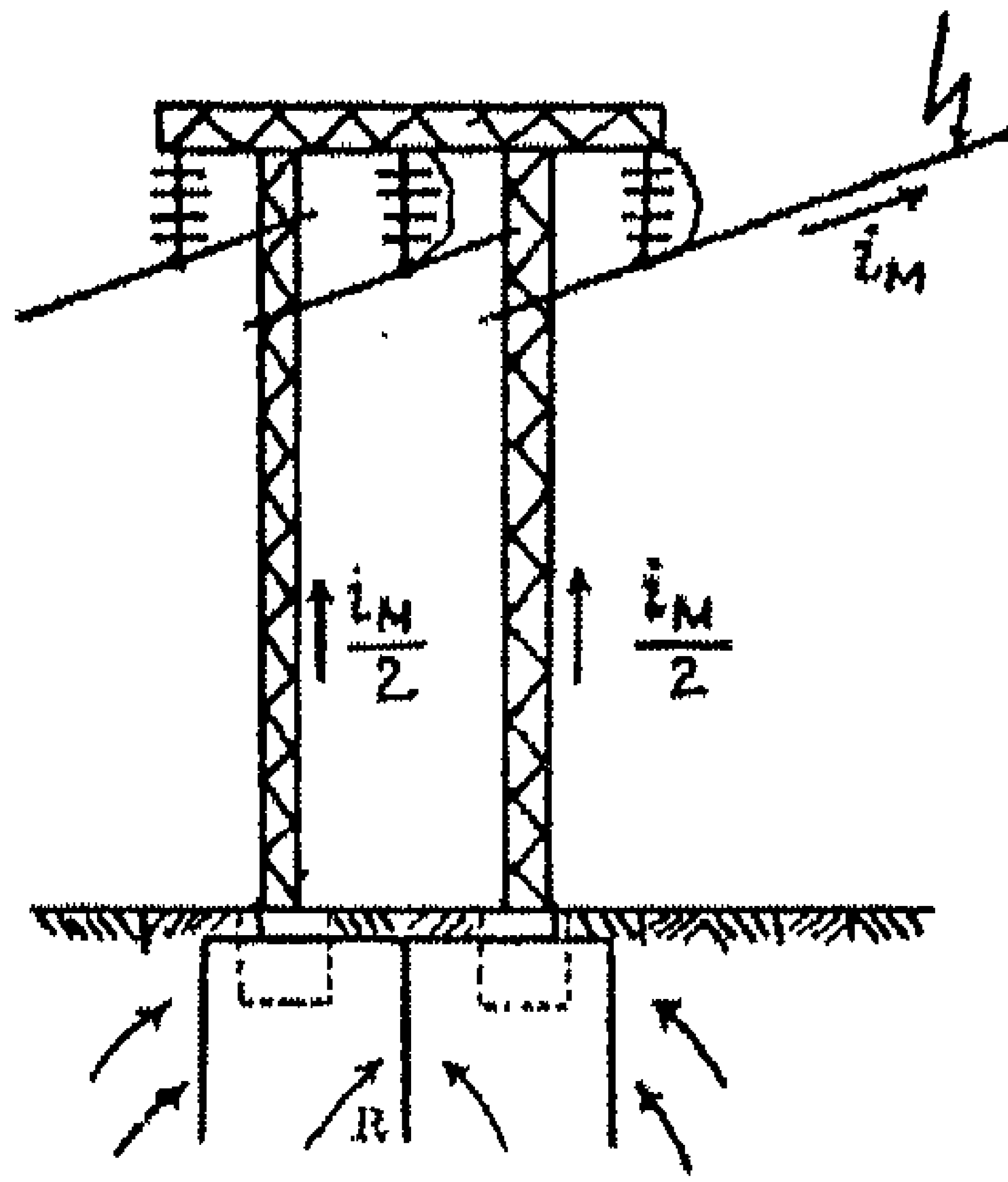
$$E_{op} = \frac{110}{\sqrt{3} \times 1.2} = 53 \text{ kV/m}$$

واحتمال تحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة – على أساس الجدول 12.9، $\eta = 0.6$. العدد النوعي لتقطعات الخطوط 110 kV على الدعائم المعدنية بدون أسلاك أرضية مع $h_{con} = 10$ m، على أساس شرر مفرد الطور للعزل –بذلك– ستكون:

$$n = 1.8 \times 10 \times 0.8 \times 0.6 = 8.6$$

هذا العدد من التقطعات في سنة، يكون طبعاً كبير بدرجة غير عادية، من هنا فإن خطوط 110 kV التي على دعائم معدنية بدون أسلاك أرضية، في المناطق ذات الشدة المتوسطة والكبيرة من نشاط الصواعق لا تستطيع أن تعمل بشكل مُرضي. ويمكن أن نقول نفس الكلام على الخطوط ذات الجهود الأعلى. فمثلاً، بالنسبة لخطوط 500 kV يكون احتمال شرر العزل على أساس قيمة كبيرة من متانته الدفعية منخفضاً حتى $v_{fl} = 0.5$، ولكن في نفس الوقت فإن احتمال تغير شرر العزل إلى قوس قدرة متزايد حتى $\eta = 1.0$ –لذلك– فإن العدد النوعي للتقطعات يبقى كبيراً جداً –خاصة– إذا اعتبرنا أن الخطوط ذات الجهود العليا لها ارتفاع أكبر أيضاً.

وعموماً، يوجد موقف مختلف على خطوط 35 kV العاملة في نظام ذات تعادل معزول، وخاصة إذا استخدم فيه جهاز لإطفاء القوس. في هذه الأنظمة، لا يسبب شرر الطور المفرد للعزل تقطع للخط، حيث إن القوس ذات التيار السعوي في معظم الحالات يطفئ بواسطة ملف إطفاء القوس، $\eta \cong 0$ بغض النظر عن قيمة E_{op}. وبالتالي، فإن تقطعات الصواعق لخطوط 35 kV يمكن أن تحدث فقط في حالة الشرر ثنائي أو ثلاثي الطور.



الشكل 12.53: شرارة طورين في حالة ضربة صاعقة في موصل خط على دعائم معدنية

وسوف نشرح احتمال الشرر ثنائي الطور على خط ذات دعائم معدنية [الشكل 12.53]. في الخطوط ذات الوضع الأفقي للموصلات، يحدث دائماً عملياً تفريغ الصاعقة على الموصلات الخارجية كما هو مبين في الشكل 12.53، وفي الخطوط ذات الوضع الرأسي للموصلات على الموصلات العليا. ضربات الصواعق في أي موصل حتى لخطوط 110 kV [وأيضاً لخطوط 35 kV] تؤدي دائماً لشرر العزل لهذا الموصل، وبعدها يبدأ تيار الصاعقة في التدفق إلى الأرض خلال قاعدة البرج وتأريضه تأريض البرج يمكن أن يكون طبيعياً عندما تستخدم أساسات البرج لهذا الغرض أو صناعي عندما يتم تمديد إلكترودات إضافية في الأرض بجوار الأساسات. لخطوط 110 kV وما فوقها وبدون أسلاك أرضية [هذه الحالة نادرة، حيث خطوط الجهد العالي يوصى بأن تُحمى بأسلاك أرضية] والتي فيها يحدد عدد التقطعات بواسطة شرر مفرد الطور. فإن قيمة مقاومة التمور R للتأريض لا تلعب أي دور عملياً. بالنسبة لخطوط 35 kV -كما سنرى- فإن هذه المقاومة ذات أهمية كبيرة.

وبهذا الأسلوب، بعد شرر عزل الموصل المضروب توضع مقاومة صغيرة في مسار التيار في مكان معاوقة تمور الموصل $Z_{con}/2$. وإذا حدث تفريغ الصاعقة على الموصل عند مسافة صغيرة من البرج، فإن تيار الصاعقة كامل يبدأ في التدفق خلال مقاومة التأريض ويكتسب جسم البرج جهد يساوي $I_M R$ تقريباً. وسيكون للموصل المضروب أيضاً نفس الجهد وبسبب ذلك سيستحث فولت $k_d I_M R$ في الموصل المجاور، حيث k_d هو معامل التقارن بين الموصل الأوسط والموصلات الخارجية مع اعتبار التصحيح للكورونا. وبهذا الأسلوب يؤثر جهد $I_M R(1-k_d)$ على عزل الموصل الثاني وسيحدث شرر عزل لهذا الموصل إذا كان:

$$I_M = I_p \geq \frac{V_{50\%}}{R(1-k_d)} \qquad (47.12)$$

حيث $V_{50\%}$= أدنى جهد شرر دفعي لسلسلة لقطبية موجبة لموجة على الوصل.

فمثلاً، إذا كان لخط 35 kV أخذنا $V_{50\%} = 350$ kV، $k_d = 0.3$، ولمقاومة تأريض $R = 10\ \Omega$، $I_p = 50$ kA، $v_{fl} = 0.15$. وحيث إن احتمال التحول لخطوط 35 kV $\eta = 0.52$، فإن العدد النوعي لتقطعات خطوط 35 kV بدون أسلاك أرضية، تعمل في نظام له ملفات إطفاء قوس [لـ $R = 10\ \Omega$] سيكون مساوياً للآتي:

$$n = 1.8 \times 10 \times 0.15 \times 0.52 = 1.4$$

أي عدد أقل من المرات عن خط 110 kV . ومع ذلك، يجب أن نتذكر، أن عدد تقطعات خط 35 kV يعتمد -إلى حد كبير- على مقاومة التأريض للبرج. وهكذا، مثلاً، بالنسبة لـ $R = 20\ \Omega$، يزداد العدد النوعي للتقطعات حتى 3.6، أي أكثر من الضعف، ومع تخفيض R حتى $R = 5\ \Omega$ فعلى العكس فإنها ستنخفض بحوالي سبعة أمثال. من هنا فإنه على خطوط 35 kV على دعائم معدنية وبدون أسلاك أرضية، يكون مرغوب استخدام تأريض صناعي لتخفيض مقاومة تأريض الأبراج.

خطوط الدعائم الخشبية — Lines on Wooden Supports

أثناء ضربة الصاعقة في موصل خط على دعائم خشبية، يكون هناك مساران ممكنان للشرر موضحان في الشكل 12.54 ولهما أدنى جهود شرر دفعية $V^a_{50\%}$، $V^b_{50\%}$ على الترتيب.

يؤثر الجهد الكامل للموصل عبر المسار 'a' -وبالتالي- فإن تيار الصاعقة المسبب للشرر عبر هذا المسار يكون:

$$I^a_M = \frac{V^a_{50\%}}{100}$$

فرق الجهد بين الموصل المضروب والموصل المجاور يؤثر عبر المسار 'b' بحيث:

$$I^b_M = \frac{V^b_{50\%}}{100(1-k_d)} \qquad (48.12)$$

كل من مساري الشرر يكون مجموعة مؤتلفة من عزل الهواء والبورسلين مع عزل الخشب، وتقدير متانته يكون صعب جداً لأن توزيع الجهد بين مكونين من العزل يعتمد كثيراً جداً شرط الخشب. قيم المتانة الدفعية المعطاة في الفصل ٦ هي الحد الأدنى الممكن ويمكن أن تستخدم لتقدير الجهود التي يمكن أن تقاوم جيداً بواسطة العزل. ولمقارنة احتمال الشرر عبر المسارين 'a'، 'b' من الأساسي استعمال قيمة المتانة الكهربية المتوسطة لعزل الخشب. وهذا يعطي دائماً

$I_M^a > I_M^b$ ، أي أولاً، شرر العزل بين الأطوار، وبعد ذلك، إذا كان تيار الصاعقة كبير بدرجة كافية، فإن شرر العزل للأرض يحدث. إلى جانب ذلك، احتمال تحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة عبر المسار 'a' يكون أقل. وفي الحقيقة، إذا كان طول المسار 'a' $l_a \cong 10$ m ، فإن تدرج جهد التشغيل لخط 110 kV يكون مساوياً للآتي:

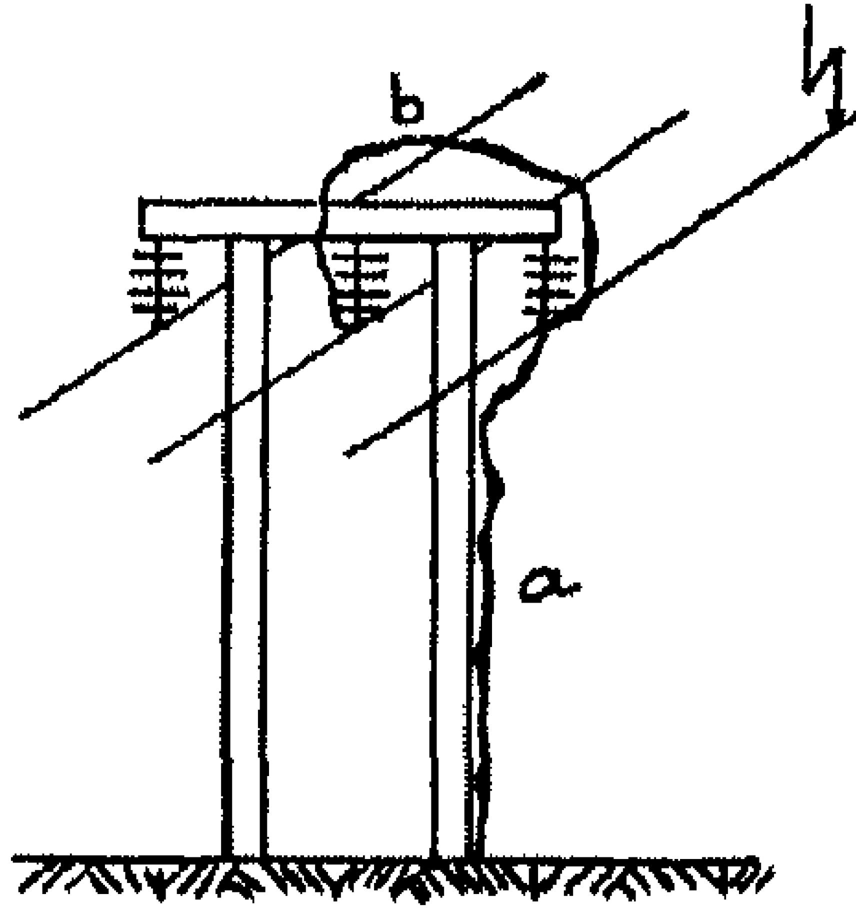
$$E_{op} = \frac{110}{10\sqrt{3}} = 6.4 \text{ kV/m}$$

والمعامل $\eta = 0$ –وفي أي حالة– يعتبر أقل من 0.1. وإذا كان طول المسار 'b' $l_b \approx 6.5$ m فإن:

$$E_{op} = \frac{110}{6.5} = 17 \text{ kV/m}$$

والمعامل $\eta = 0.2$ ، أي أكبر بعدة مرات قليلة.

وحيث إن الدعائم الخشبية بدون أسلاك أرضية ليس لها أي تأريض، فإنه بعد شرر الدعامة الخشبية للأرض، تبقى المعاوقة في دائرة التيار عالية ولا يحدث انخفاض ملحوظ في الجهد. لذلك، تكون تلك الحالات ممكنة أيضاً، عندما يحدث شرر العزل عبر كلا المسارين في آن واحد، ولكن قوس القدرة ينتج فقط بين الأطوار، وعلى أساسه يحدث التقطع.



الشكل 12.54: ضربة صاعقة مباشرة في موصل خط على دعائم خشبية

ولذلك فإن المستوى الواقي للخطوط على الدعائم الخشبية يُحدد طبقاً للمعادلة (12.48). فمثلاً، بالنسبة لخط 110 kV إذا أخذنا $V_{50\%} = 1690$ kV، $k_d = 0.3$ ، فإن $I_p = 24$ kA ، $v_{fl} = 0.46$ ويكون العدد النوعي من التقطعات:

$$n = 1.8 \times 10 \times 0.4 \times 0.2 = 1.4$$

ويجب أن نتذكر هنا أن أدنى قيمة ممكنة للجهد تؤخذ مساوية لـ $V_{50\%}$، ومن هنا فإن العدد الفعلي للتقطعات سيكون أقل قليلاً.

ومن هذا المثال، نرى أن أي خط على دعائم خشبية وبدون أسلاك أرضية يكون له مقاومة صواعق أكبر من خط على دعائم معدنية له نفس الجهد الاسمي.

١٢-٨-٤ ضربة الصاعقة المباشرة لخط ذو أسلاك أرضية

Direct Stroke of Lightning into a Line with Ground Wires

تأخذ الأسلاك الأرضية المعلقة على خطوط النقل ولها زوايا حماية أساسية على عاتقها قدراً كبيراً من كل ضربات الصواعق. ومع ذلك، فحتى في وجود الأسلاك الأرضية، يتواجد احتمال معين لضربات الصواعق المباشرة على الموصلات الموجودة يمكن تحديدها على أساس تحليل خبرة تشغيل عدد كبير من الخطوط. وحديثاً، في دول مختلفة في العالم تستخدم بتزايد خطوط من دائرتين على دعائم مفردة، ارتفاعها لخطوط 400 kV يصل إلى (40–45) m. وتسمح الخبرة الصغيرة المتاحة حالياً لتشغيل هذه الخطوط باستنتاج أن احتمال ضربات الصواعق على الموصلات عبر السلك الأرضي تتزايد مع زيادة ارتفاع الخط. ومعالجة البيانات المتاحة المنفذة بواسطة LPI تسمح بفرض علاقة تجريبية –بمساعدتها– يمكن تحديد احتمال القطع خلال الصواعق خلال وقاية السلك الأرضي ν_α كدالة في زاوية الحماية α وارتفاع البرج h_t كالآتي:

$$\log \nu_\alpha = \frac{\alpha\sqrt{h_t}}{90} - 4 \qquad (49.12)$$

وبالرغم من أن هذه العلاقة تتطلب مزيداً من التحقق العملي، إلا أنها تشير بيانياً للزيادة الحادة لاحتمال الضربات المباشرة على موصل مع زيادة زاوية الحماية α. فمثلاً، بالنسبة لـ $\alpha = 20°$، $h_t = 25$ m فإن احتمال القطع $\nu_\alpha = 0.00125$، بالنسبة لـ $\alpha = 35°$، $\nu_\alpha = 0.009$ أي تزداد بأكثر من سبعة مرات. وبالنسبة لارتفاع برج 36 m ونفس زوايا الحماية فإن احتمال القطع يزداد حتى 0.002، 0.021 أي الضعف تقريباً.

حتى إذا لم نعتبر إمكانية قطع الصاعقة خلال حماية السلك الأرضي، فإن إقامة الأسلاك الأرضية لا تضمن جودة مقاومة الصواعق المطلقة لخطوط النقل –حيث– أثناء تفريغ الصواعق المكثف في الأسلاك الأرضية يمكن أن ينتج جهد يتعدى المتانة الدفعية له على عزل الخط. وهنا من الضروري أن نفرق بين ضربات الصاعقة في السلك الأرضي في الجوار المباشر للبرج عندما يهبط عزل الخط في منطقة مجال كهرومغنطيسي قوي لقناة الصاعقة، وتيار الصاعقة الكامل المار خلال البرج وضربات الصواعق في السلك الأرضي في جوار مركز الباع، عندما يبدو تأثير المجال الكهرومغنطيسي صغير لدرجة الإهمال، ويُقسم تيار الصاعقة بالتساوي تقريباً بين برجين متجاورين.

ضربة الصاعقة في سلك أرضي قريب من البرج

The Stroke of Lightning into a Ground Wire Near the Tower

للتبسيط سنفحص حالة ضربة صاعقة عند قمة برج ذات أسلاك أرضية [الشكل 12.55]. يتفرع تيار الصاعقة عند مكان الضربة، جزء كبير منه يسري إلى الأرض خلال تأريض البرج المضروب والجزء الأصغر يمر خلال الأسلاك الأرضية ويوجه إلى تأريض الأبراج المجاورة. أثناء ذلك، تنتج مركبات الجهد التالية على العزل:

١. هبوط الجهد عبر تأريض البرج المضروب، والناشئة بواسطة مرور تيار البرج خلاله $i_t < i_m$ والذي يساوي $i_t R$، حيث R تساوي المقاومة الدفعية لتأريضه.

٢. المركبة المغنطيسية للجهد المستحث، الطبيعة الفيزيائية لها تكون مماثلة تماماً لتلك الخاصة بضربة الصاعقة للأرض. في الحالة الراهنة، من المناسب تمثيل الجهد المستحث بواسطة المجال المغنطيسي على هيئة مجموع جهدين مستحثين على التوالي بواسطة التيار في البرج i_t والتيار في قناة الصاعقة i_m بحيث:

$$v_{iM} = L_{tow}^{con} \frac{di_t}{dt} + M^{con}(t) \frac{di_m}{dt} \qquad (50.12)$$

حيث L_{tow}^{con} = محاثة البرج على القطاع من سطح الأرض حتى مستوى تعليق الموصل.

الدالة $M^{con}(t)$ = المحاثة المتبادلة بين قناة الصاعقة والإطار الأرضي للموصل. وهي دالة في الزمن حيث إنه بالتناسب مع نمو التفريغ الرئيسي، يزداد طول قناة الصاعقة تدريجياً.

٣. المركبة الكهربية للجهد المستحث الناتج بواسطة المجال الكهربي لقناة الصاعقة والذي هو مماثل تماماً للمركبة المناظرة أثناء ضربه إلى الأرض.

٤. الجهد المستحث على الموصل بواسطة موجات راحلة بطول السلك الأرضي. إذا كان جهد السلك الأرضي يساوي $V_{g.w}$ فإن مركبة هذا الجهد تساوي $kV_{g.w}$ حيث k هي معامل التقارن بين الموصل والسلك الأرضي [أو الأسلاك]. وحيث إنه أثناء عملية انتشار الموجات عبر السلك الأرضي، تحدث انعكاسات متعددة من الأبراج المجاورة تخفض جهد السلك الأرضي، فإن هذه الموجات المنعكسة يمكن توقف مؤقتاً كورونا الأسلاك الأرضية. ولهذا فإن معامل التقارن أثناء هذه العملية يكون له قيم مختلفة

وعند لحظة إيقاف الكورونا، يكون مساوياً للمعامل الهندسي. لهذا ففي الحالة المعطاة –ولكي نكون في الجانب الآمن– يجب أن يؤخذ بدون تصحيح الكورونا.

الشكل 12.55: ضربة صاعقة مباشرة في برج خط ذات أسلاك أرضية

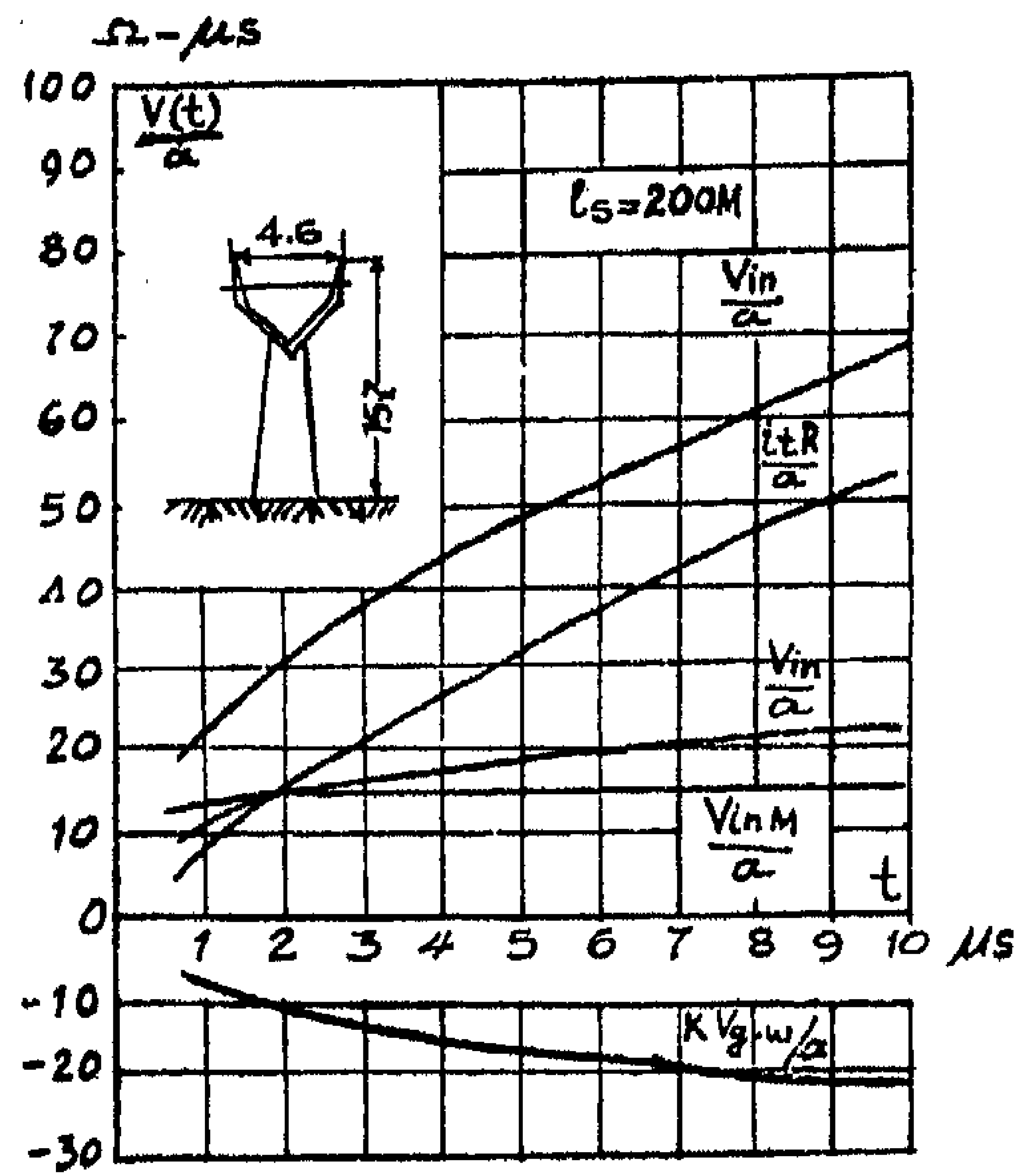
تكون المكونات الثلاثة الأولى للجهد على العزل لها نفس الإشارة وبالنسبة للقطبية السالبة لتفريغ الصواعق، يحصل الموصل على جهد موجب بالنسبة لجسم البرج. وتكون المركبة الأخيرة ذات إشارة موجبة –وبالتالي– فإنها تسبب تخفيض الجهد المحصل على العزل.

بالتوافق مع ما سبق قوله، فإن الجهد على عزل برج مضروب بصاعقة ذات موجة لها زاوية مائلة $i_m = \nu t$ يكون:

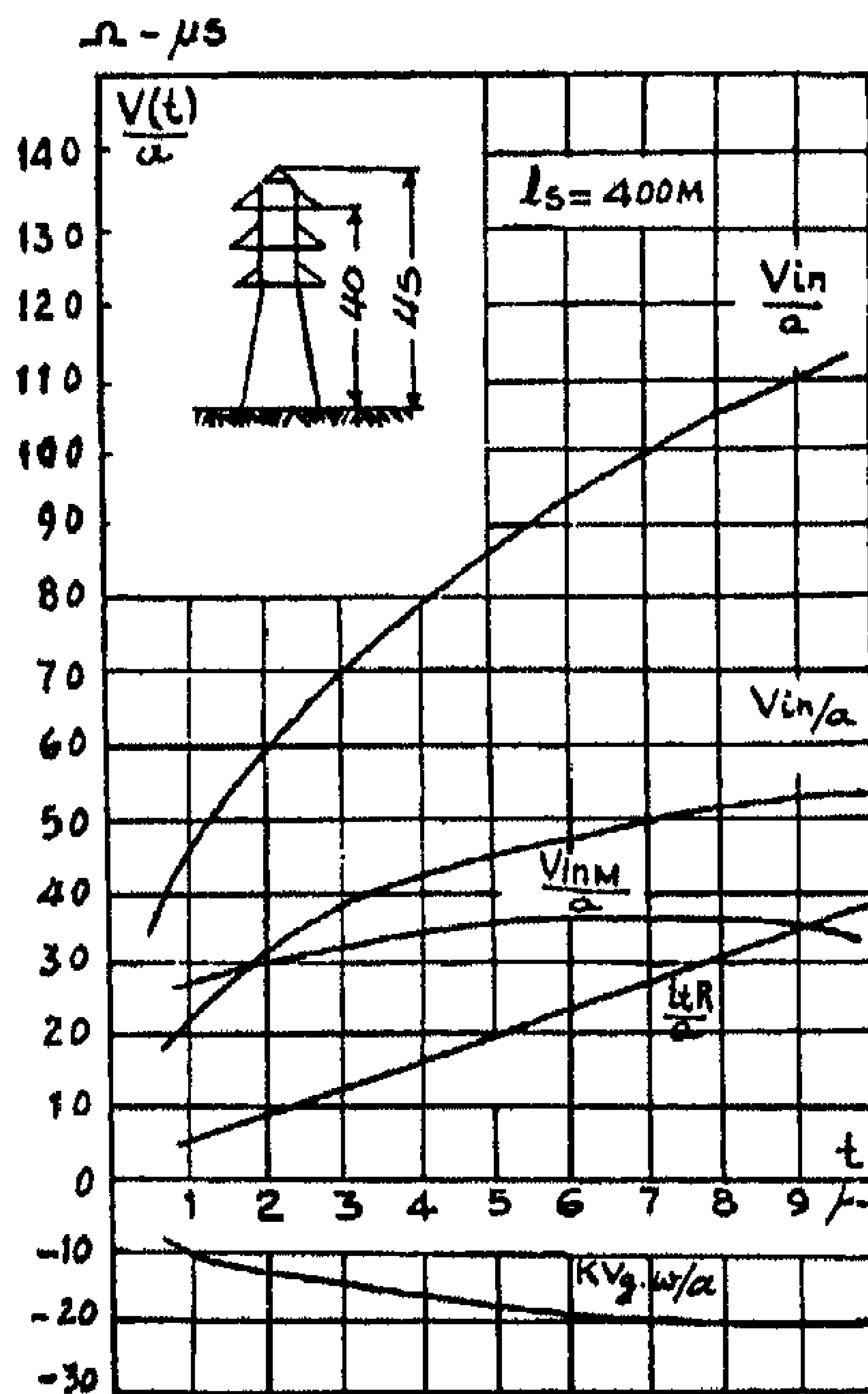
$$v_{in}(t) = i_t R + L_{tow}^{con} \frac{di_t}{dt} + aM^{con}(t) + V_{i.e}(t) - kV_{g.w}(t) \quad (51.12)$$

وللحصول على فكرة كمية عن الأهمية النسبية للمكونات المنفصلة للمعادلة (12.51)، فإن القيم المحسوبة للجهد على عزل عدد اثنين خط نقل مختلفين موضحة في الشكلين 12.56، 12.57. الخط الموضح في الشكل 12.56 له سلكان أرضيان وارتفاع برجه ليس كبيراً جداً. لذلك، فإن كلا من المركبات المغنطيسية والكهربية للجهد المستحث لها مقادير صغيرة نسبياً، ومن هنا فإن هبوط الجهد في مقاومة التأريض للبرج تكون ذات أهمية كبيرة.

الخط الموضح في الشكل 12.57 –على العكس– مزود بسلك أرضي واحد فقط وارتفاع برجه عالي جداً. وحسب ذلك، فإن الجهود $V_{i.e}$، $V_{i.M}$ المستحثة بواسطة المجال الكهرومغنطيسي تحتل المكان الأول وتحدد الجهد على العزل إلى حد معقول. وبسبب وجود سلك أرضي واحد فإن المركبة $kV_{g.w}$ يكون لها تأثير أقل من الحالة السابقة.

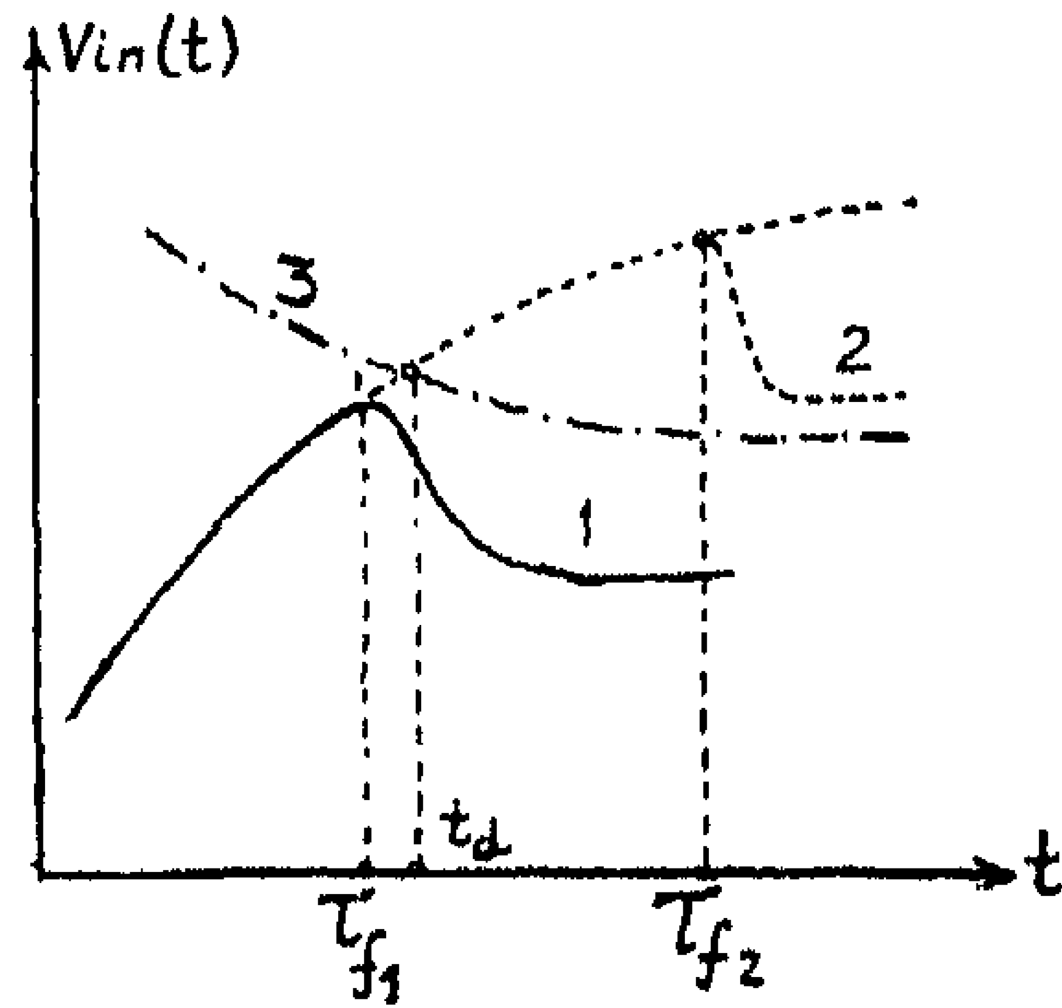


الشكل 12.56: الجهد على عزل خط دائرة مفردة ذو سلكان أرضيان والمكونات المنفصلة لهذا الجهد. مقاومة البرج $R = 10\ \Omega$



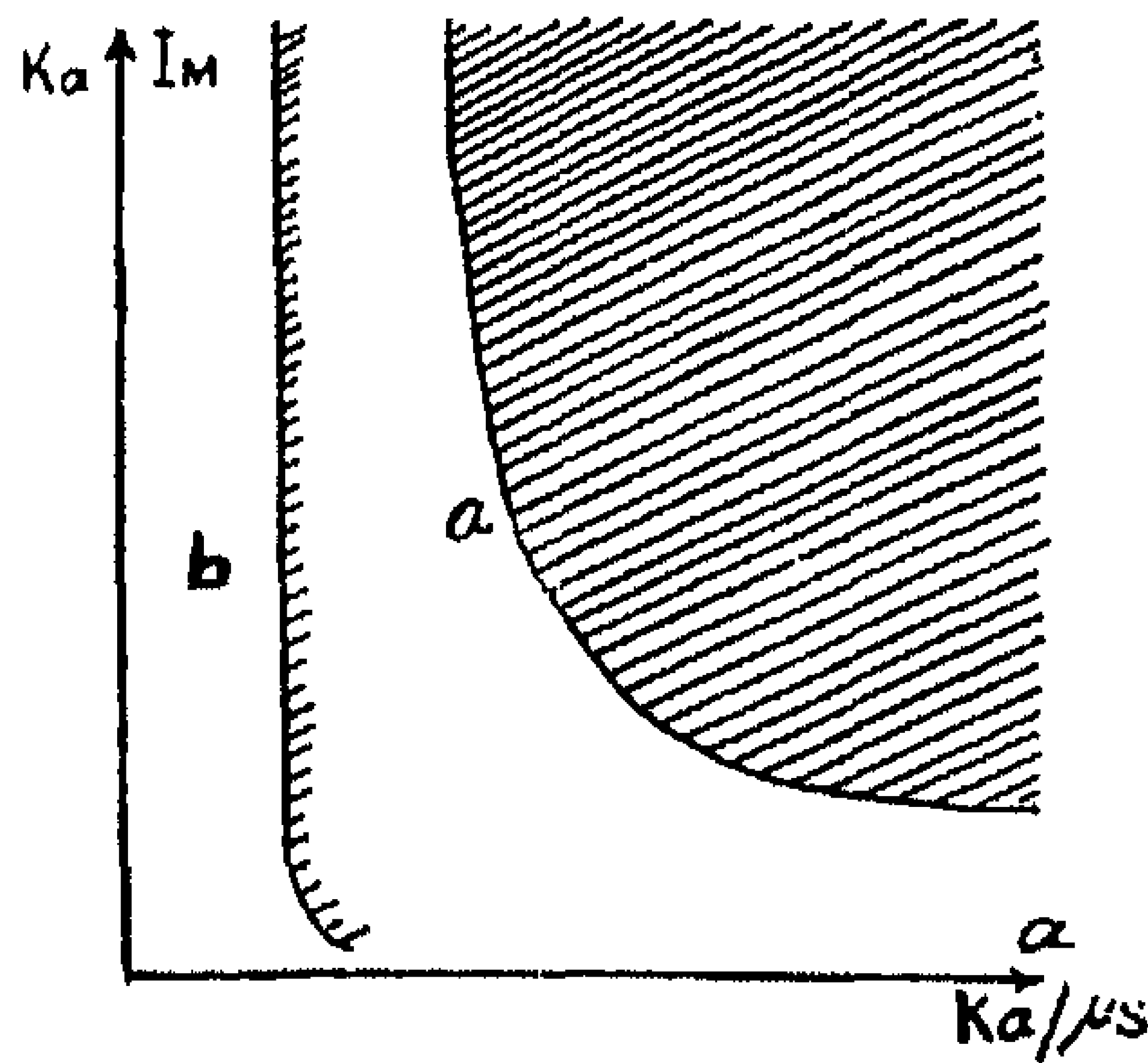
الشكل 12.57: الجهد على عزل خط دائرة مزدوجة ذو سلك أرضي واحد والمكونات المنفصلة لهذا الجهد $R = 5\ \Omega$

المنحنيـات في الأشـكال 12.56، 12.57 تـسري فقـط أثنـاء فـترة الجبهـة front عنـدما يتغير التيـار حـسب القـانون $I_M = at$. بعـد نهاية الجبهة، يهبط الجهد المستحث بحـدة، لذلك فإن الجهد المحصل على العزل يكون لـه الشكل الموضح في الـشكل 12.58. وبالأخـذ في الاعتبار شـكل خـصائص الفولـت-ثانيـة لعـزل الخـط، يمكـن اعتبـار شـرر العـزل بعـد نهايـة الجبهـة وذلـك احتمـال أقـل. ويحـدد زمـن التفريغ على الجبهة t_d بواسطة تقاطع منحنى الفولت على عزل الخط مع خصائص الفولـت-ثانية له، كما هو موضح في الشكل 12.58.



الشكل 12.58: الجهد على عزل خط مع أطوال مختلفة لجبهة موجة التيار $\tau_{f_2} > \tau_{f_1}$. المنحنـى 3 هـو خـصائص الفولـت-ثانيـة لعزل الخط

إذا رسـم منحنـى فولـت العـزل لانحـدار معطى لتيار الصاعقة $a = a_1$، فإن ذلك يحـدد السعة الخطيرة لتيـار الـصاعقة $I_{M_1} = a_1 t_{d_1}$. ومن الواضح أن كل تفريغات الـشرر لهـا تـدرج $a \geq a_1$، الـسعة $I_M \geq I_{M_1}$ ستـسبب شـرر عزل الخط. وبإجراء رسم منحنى فولـت العـزل لانحـدار آخـر $a = a_2$، فـإن القيمـة المقابلـة للسعة الخطيرة $I_{M_2} = a_2 t_{d_2}$ يمكـن الحـصول عليها. وكنتيجة لإنـشاء مثـل هـذه المنحنيـات يمكـن إنـشاء مـا يـسمى "منحنـى البـارامترات الخطـيرة" والـذي يُعـرِّف منطقـة التوليفـات الخطـيرة مـن التـدرج وسـعة تيـار الـصاعقة [الشكل 12.59]. كل تفريغات الصواعق التي لها تدرج وسعة تيار وموجودة داخل حدود الجـزء المظلل للمستوى (a, I_M) ستسبب شرر لعزل الخط.



الشكل 12.59: منحنيات البارامترات الخطـرة لخـط بـدون أسـلاك أرضـية. (a) مقاومـة أساسـات الـبرج صـغيرة؛ (b) مقاومـة أساسات البرج كبيرة

وبهذا الأسلوب، في حالة ضرب برج خط له أسلاك أرضية، فإن شرر عزل الخط يحدد بواسطة كل من سعة وانحدار تيار الصاعقة، ولتحديد v_{fl}، من الضروري معرفة احتمال توليفة هذان البارامتران. وعلى أساس البيانات المتاحة، فإن هذا الاحتمال لا يمكن أن يكون ثابتاً بدرجة كافية مما يجعل استخدام منحنيات البارامترات الخطرة لتحديد العدد النوعي للتقطع صعباً.

وبسبب ذلك، وبالمثل بسبب التعقيد في الحسابات النظرية لمنحنيات البارامترات الخطرة لتحديد العدد النوعي لتقطعات خط، يكون مطلوب استخدام طريقة تقريبية. لذلك فإن فكرة المستوى الوقائي protective level يمكن أن يوصى باستخدامه لهذه الخطوط ذات الأسلاك الأرضية وأيضاً التي بدون أسلاك أرضية. هذا المستوى الوقائي –في الحالة تحت الاعتبار– يكون مشروط في الطبيعة حيث يتجاهل تأثير انحدار تيار الصواعق.

من الشكلين 12.56، 12.57 نرى أنه حتى لارتفاعات البرج الصغيرة، فإن الجهود المستحثة –بشكل عام– تتعدى الجهد السالب المستحث بواسطة التيار في السلك الأرضي. وبهذا الأسلوب، يكون الجهد على العزل أكبر دائماً من هبوط الجهد $i_t R$ في مقاومة تأريض البرج ويمكن أن تكون أكبر من المقدار $i_M R$. وبعبارة أخرى، وجود جهد مستحث –لذلك– يسبب زيادة غير واقعية في مقاومة البرج، والتي تتكون من مقاومة إضافية معينة موصلة على التوالي مع R، هذه المقاومة الإضافية تكون متناسبة مع ارتفاع البرج. لذلك للتقدير التقريبي جداً للمستوى الوقائي لخط له أسلاك أرضية في حالة ضربة صاعقة للبرج، يمكن استخدام العلاقة التالية:

$$I_p \approx \frac{V_{50\%}}{R + \delta h_t} \tag{52.12}$$

حيث $V_{50\%}$= أدنى جهد شرر دفعي لعزل طور الخط (kV).

R = مقاومة تمور surge resistance تأريض البرج (Ω).

h_t = ارتفاع البرج (m).

δ = معامل يحدد على أساس المقارنة مع نتائج الحسابات طبقاً لعلاقة أكثر دقة. ويمكن أن يؤخذ $\delta = 0.15$ كتقريب أول لخط له سلكان أرضيان، $\delta = 0.30$ لخط له سلك أرضي واحد.

اعتماد المعامل δ على عدد الأسلاك الأرضية يكون واضحاً. أولاً، في وجود سلك أرضي، فإن معامل التقارن k بين السلك الأرضي والموصلات يزداد ومن هنا فإن الجهد $kV_{g.w}$ – المستحث بواسطة التيار في السلك الأرضي– الذي يخفض الجهد في العزل – يزداد أيضاً.

وثانياً، مع سلكين أرضيين، فإن معاوقة تمورهم المكافئة والمحاثة ينخفضا. وعلى ذلك، يزداد التيار في الأسلاك الأرضية وبالتالي، ينخفض التيار في البرج المضروب بالصاعقة مما يُخفض الجهد على العزل.

وبعد إيجاد المستوى الوقائي، حسب المعادلة (12.52) أثناء ضربة البرج، يُحدد احتمال الشرر بالطريقة العادية بمساعدة المعادلة (12.3). وكدليل تقريبي، يمكن أن نأخذ خلال ذلك ضمان أن دقة تحديد v_{fl} هي في حدود %(30–25)، والاستثناء هو الخطوط التي لها احتمال صغير جداً للشرر، حيث يمكن أن يكون الخطأ أكبر.

ضربات الصواعق عند منتصف الباع Stroke of Lightning at the Middle of a Span

في حالة ضربة الصاعقة على سلك أرضي توصل معاوقة تمورية $Z_{g.w}/2$ إلى مكان الضربة، وعند اللحظة الأولى من الزمن بعد الضربة، يمكن تحديد الجهد على السلك الأرضي من العلاقة التالية والمماثلة للمعادلة (12.44):

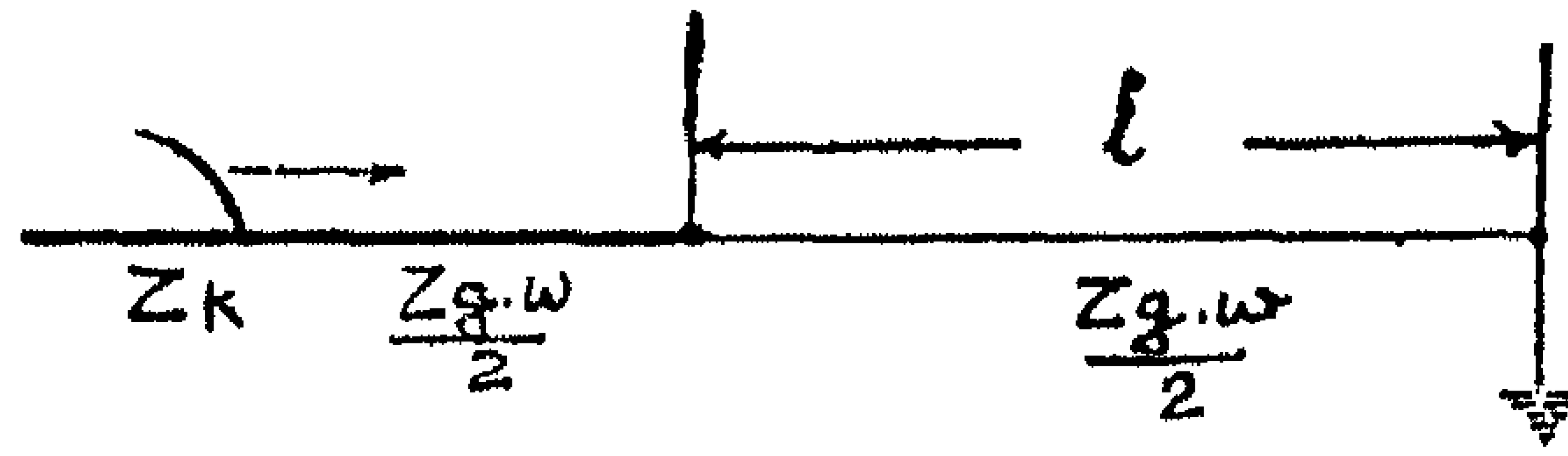
$$v_{g.w} = \frac{i_M(t)}{4} \cdot Z_{g.w} \square 100 i_M(t) \qquad (53.12)$$

حيث إن معاوقة تمور السلك الأرضي تكون بنفس حدود قيمة معاوقة تمور الموصل.

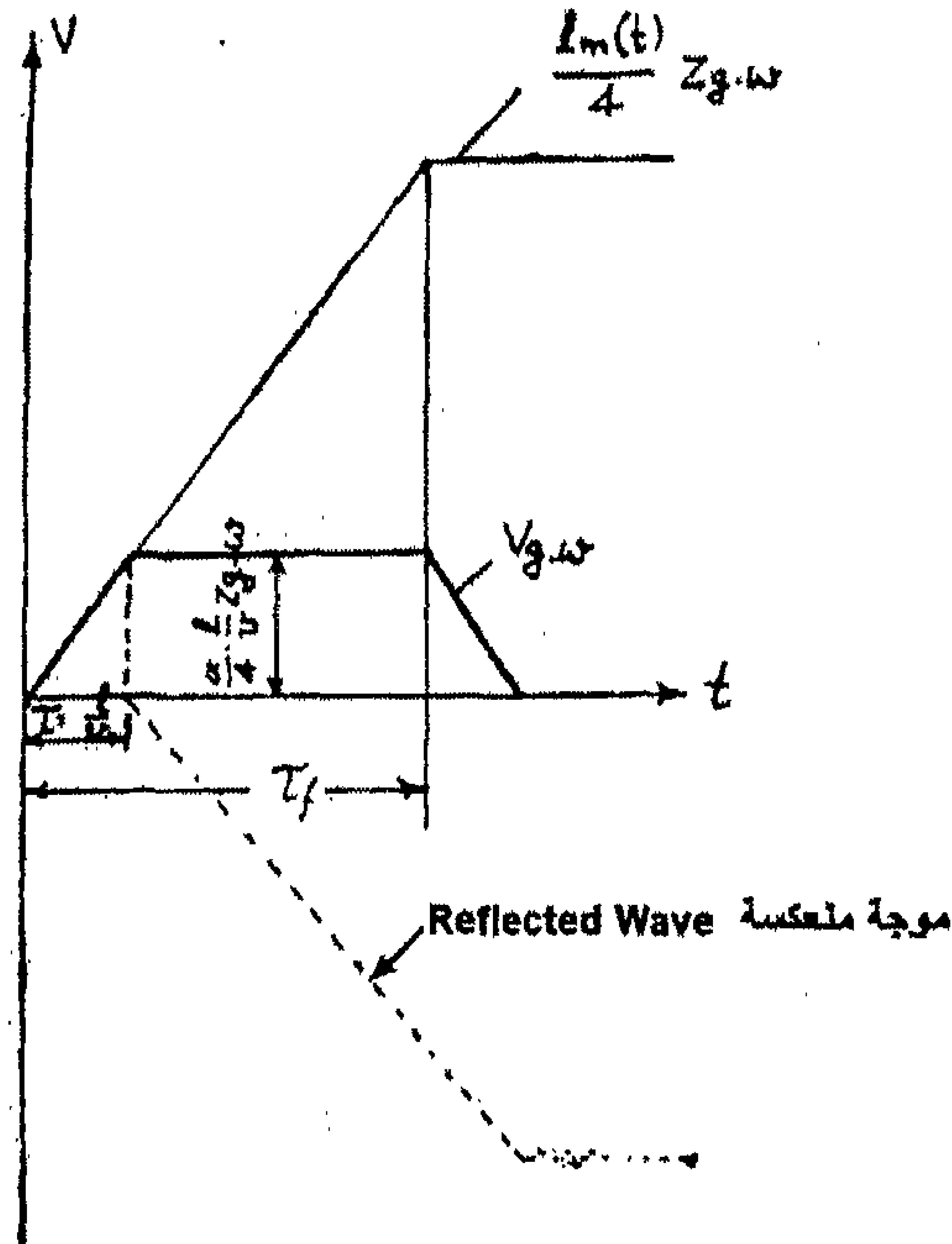
ومع ذلك، فعلى نقيض الموصلات، تكون الأسلاك الأرضية مؤرضة عند كل برج، مقاومة تأريض البرج R تكون عادة أقل من معاوقة تمور السلك الأرضي $\left(R \le Z_{g.w}\right)$. لذلك، فإن موجة الفولت على السلك الأرضي بعد الوصول إلى أقرب برج، ستنعكس عملياً كما يحدث في طرف مقصر، أي مع معامل الانعكاس $\beta = -1$. وللتبسيط، إذا فرضنا أن تفريغ الصاعقة حدث في منتصف الباع بالضبط، فإن الموجات المنعكسة من البرجين المجاورين سيصلان إلى نقطة الضرب في آن واحد ويمكن تحديد الجهد عند مكان الضرب تقريباً من الدائرة في الشكل 12.60، والتي فيها يمكن أن نأخذ معاوقة تمور قناة الصاعقة لتكون مساوية تقريباً لـ $Z_k = Z_{g.w}/2$. في هذه الحالة لن يحدث انعكاسات موجات عند مكان الضربة ومع موجة تيار صاعقة ذات زاوية مائلة، فإن الجهد على السلك الأرضي سيتغير مع الزمن بالأسلوب الموضح في الشكل 12.61، ومنه نرى أن أقصى جهد على السلك الأرضي يساوي

$$V_{g.w_{max}} = \frac{a}{4} Z_{g.w} \frac{l}{v} \qquad (54.12)$$

أي أنه يعتمد على انحدار تيار الصاعقة فقط ولا يعتمد على سعته.



الشكل 12.60 : الدائرة المكافئة في حالة ضربة صاعقة في منتصف الباع



الشكل 12.61: الفولت عند منتصف الباع أثناء ضربة صاعقة

تحت تأثير موجة دفعية تتحرك بطول السلك الأرضي، سيستحث أيضاً جهد محـدد على الموصل:

$$V_{con} = K_d V_{g.w}$$

حيث K_d = معامل التقـارن بـين الموصـل والـسلك الأرضـي في منتـصف البـاع مـع اعتبـار تصحيح الكورونا.

إذا افترضنا أن القيم المتوسطة لمعاوقة تمور السلك الأرضـي هـي $Z_{g.w} = 400\ \Omega$ ، وسـرعة انتشار الموجة $v = 300\ \text{m}/\mu\ \text{sec.}$ ، فإن الجهد المحصل على عازل الهواء بين الموصل والـسلك الأرضي ستساوي الآتي:

$$V_{ins} \cong (1-K_d)\frac{a\,l}{3} \quad (55.12)$$

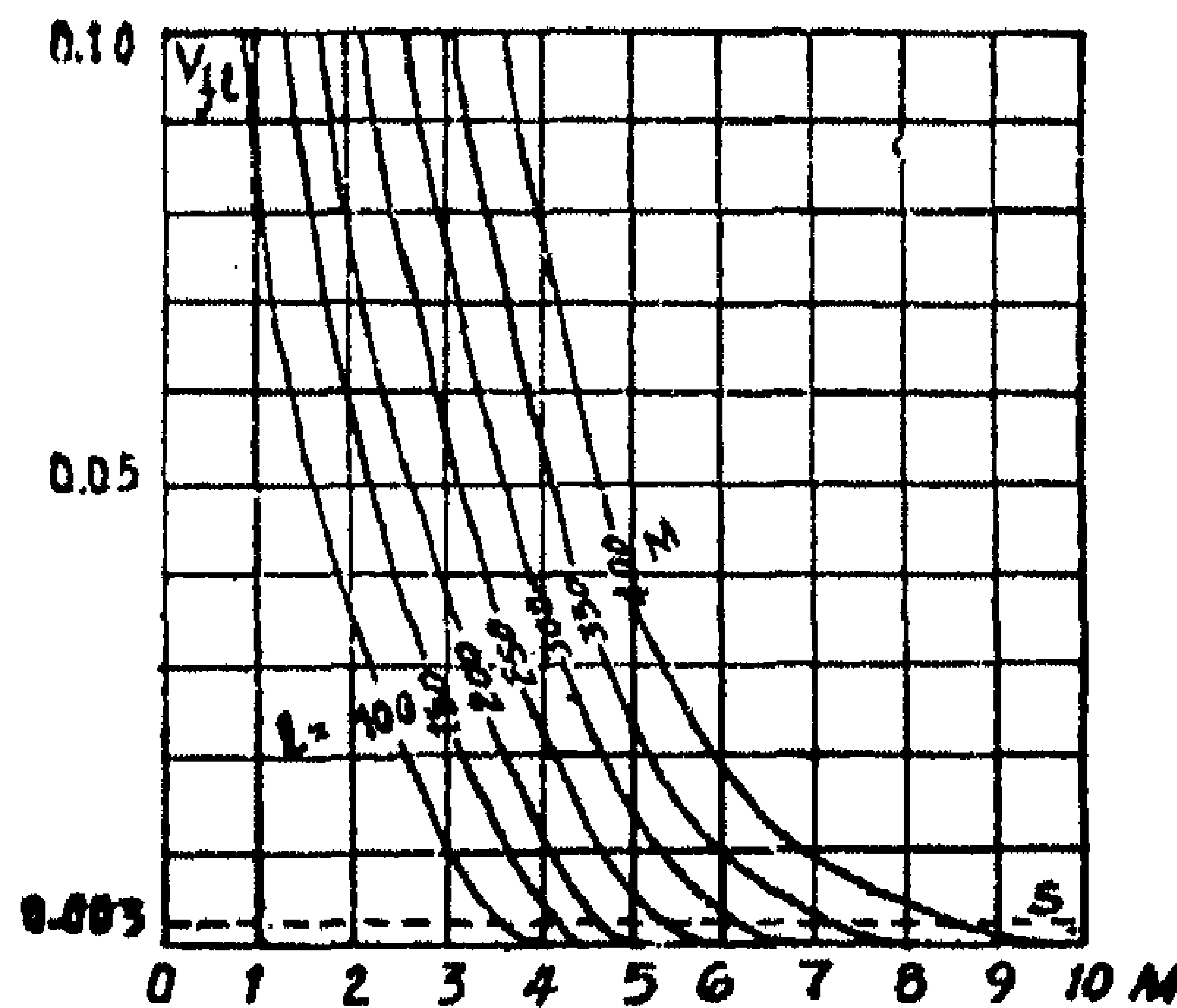
أي أنه يتحدد بواسطة انحدار تيار الصاعقة ولا يعتمد على سعته.

جهد الانهيار لثغرة الهواء بين موصل وسلك أرضي لذلك الوقت الذي نتعامل معه [في حدود تيار الصاعقة الأمامي] له قيمة قريبة من 750S kV حيث S هي المسافة بين الموصل والسلك الأرضي بالمتر.

وبهذا الأسلوب، فإن انحدار موجة تيار الصاعقة التي يحدث عندها شرر العزل يمكن تحديدها من العلاقة:

$$a \geq \frac{2250S}{(1-K_a)l} \quad (56.12)$$

وبمعرفة انحدار التيار، الذي عنده شرر عزل الخط، لا يكون صعباً تحديد احتمال شرر العزل في منتصف الباع بمساعدة منحنى الشكل 12.5.



الشكل 12.62: احتمال شرر العزل بين موصل وسلك أرضي في حالة ضربة صاعقة في وسط باع

مثلاً، إذا أخذنا قيمة متوسطة لمعامل التقارن في حدود 0.25 واعتبرناها مستقلة عن المسافة S، كتقريب أول، ثم على أساس المعادلة (12.55) والمنحنى في الشكل 12.5، من الممكن إنشاء علاقة اعتماد احتمال شرر العزل على المسافة بين السلك الأرضي والموصل لقيم مختلفة من طول الباع، والمعطاة في الشكل 12.62. في هذا الشكل، المسافات التي عندها احتمال شرر العزل 0.3% أي صغير لدرجة الإهمال، تكون معطاة. عملياً نحاول الحفاظ على هذه المسافات، حيث

إنها أساسية من وجهة نظر تمايل [ترجح] الموصلات والأسلاك الأرضية أيضاً. لذلك، فإن حالات شرر العزل في باع تكون نادرة جداً. تقطع الخطوط بسبب هذا الشرر يحدث بندرة أكبر بسبب الاحتمال الصغير لتحول الشرر الدفعي إلى قوس قدرة. فمثلاً، بالنسبة لخط 220 kV عند $S = 8$ m، يكون تدرج جهد التشغيل بطول مسار الشرر:

$$E_{op} = \frac{220}{\sqrt{3}\times 8} = 16 \text{ kV/m}$$

لذلك وبالرجوع للجدول 12.9، فإن الاحتمال $\eta = 0.2$. والآن إذا كان ارتفاع الخط يساوي 25 m، وطول الباع 350 m، فإن العدد النوعي لتقطعات الخط بسبب الشرر على الباع يكون 0.015. ولطول باع 300 m، سيكون أقل بخمسة أمثال.

حتى الآن أثناء تحليل ضربات الصاعقة عند منتصف الباع، اعتبرنا فقط احتمال شرر العزل عند مكان الضربة، حيث يكون الفولت أكبر ما يمكن.

وإلى جانب ذلك، فأثناء ضربه للباع، يكون ممكناً أيضاً، شرر عزل على الأبراج، حيث تكون متانة العزل أقل من تلك في منتصف الباع. ومع ذلك، في معظم الحالات، يكون من الممكن ألا نعتبر احتمال هذه الأنواع من الشرر. وفي الحقيقة، عند توقيت ضربة الصاعقة مباشرة على برج، فإن كل تيار الصاعقة -عملياً- يمر من خلاله، ويدمر العزل بفعل المجال الكهرومغنطيسي القوي لقناة الصاعقة. مع الضربة على الباع، يقسم تيار الصاعقة بالتساوي تقريباً بين برجين متجاورين، وإلى جانب ذلك، فإن قناة الصاعقة تكون منفصلة بمسافة كبيرة عن العزل. لذلك، فإن عدد مرات شرر العزل للسلاسل في حالة ضربه لبرج تكون أكبر مما هو في حالة ضربه باع والتي -بهذا الأسلوب- يمكن أن تهمل بدون أي خطأ محسوس. الاستثناءات يمكن أن تكون فقط في الخطوط ذات مقاومات التأريض الكبيرة والتي فيها يجب اعتبار كل حالات ضربات الصاعقة.

١٢-٨-٥ طرق الوقاية من الصواعق للخطوط ذات جهود اسمية مختلفة

Recommended Methods of Lightning Protection of Lines of Different Nominal Voltage

١. خطوط 220 kV وما فوقها تنشأ في معظم الحالات على دعائم معدنية ويجب أن تحمى بواسطة أسلاك أرضية عبر الطول الكلي للخط. في خطوط الدائرة المفردة ذات الطراز القنطري gantry type أو طراز الزجاج الخمري، يركب سلكان أرضيان، وبذلك يمكن تخفيض زوايا الحماية حتى $(20–25)°$ بدون أي صعوبة. وهذه الخطوط لها

مقاومة تأريض $10\ \Omega$ ولها عدد نوعي من التقطعات في حدود 0.06. تخفيض مقاومة تأريض البرج حتى $5\ \Omega$ تسمح بتخفيض العدد النوعي للتقطعات بحوالي 1.5 مرة. وحديثاً استخدم على نطاق واسع خطوط دائرة مزدوجة على أبراج عالية m (45–40) ومزودة بسلك أرضي واحد وتضمن زاوية حماية في حدود °(32–30). وبالنسبة للارتفاع الأعلى لهذه الخطوط تكون ذو مقاومة أقل كثيراً للصواعق. فمثلاً، خطوط 220 kV على أبراج الدائرتين لها عدد نوعي من التقطعات (1.2–1) إذا كانت مقاومة تأريض البرج $R = 10\ \Omega$ ، والتي تنخفض بحوالي %(40–30) مع تخفيض المقاومة حتى $5\ \Omega$. وحيث إن خطوط الضغط العالي الفائق تكون دائماً مزودة بقواطع دائرة آلية الغلق، فإن خطوط الدائرتين يمكن أن تعمل أيضاً باعتمادية كافية. ومع ذلك – فإن التشغيل على قواطع الدائرة، والذي سوف يقطع عدد كبير من دوائر القصر سنوياً، سيتزايد.

٢. خطوط 110 kV على دعائم معدنية بالمثل يوصى بأن تحمى بواسطة أسلاك أرضية عبر طول الخط الكلي. ومع مقاومة تأريض $10\ \Omega$ ، فإن العدد النوعي للتقطعات لخط مفرد الدائرة يكون (0.3–0.2) وذلك الخاص بخط مزدوج الدائرة يكون (0.8–0.6). وبالرغم من ذلك، في عدد كبير من الأنظمة الكهربية، تكون خطوط 110 kV لها حماية سلك أرضي فقط بالقرب من المحطات الفرعية وعند الأماكن التي يكون تفريغ الصواعق عالي جداً بها. وهذه الخطوط طبيعياً، تقطع غالباً أكثر من الخطوط ذات حماية السلك الأرضي عبر طول الخط الكلي. ومن هنا، لضمان التشغيل العادي لمثل هذه الخطوط، يكون أساسياً استخدام قواطع دائرة آلية إعادة الغلق ARC. ويجب أن نتذكر أنه في أنظمة 220 kV وما فوقها فإن الخطوط التي بدون أسلاك أرضية لا تستطيع أن تعمل عادياً حتى في وجود ARC بسبب الظروف الصعبة غير العادية التي يعمل فيها قاطع الدائرة. ويرجع ذلك إلى حقيقة أن خطوط 220 kV وما فوقها – كقاعدة– لها أطوال أكبر من تلك الخاصة بخطوط 110 kV . وبسبب ذلك فإن عدد دوائر القصر المقطعة كل سنة بواسطة قواطع الدائرة يمكن أن يتعدى القيمة المسموحة. فمثلاً، خط 330 kV بدون سلك أرضي، طوله 300 km، على أبراج مزدوجة الدائرة ارتفاعها 40 m سيتقطع حوالي 25 مرة في السنة وذلك غير مسموح لقواطع الدائرة. إلى جانب ذلك، وبسبب حقيقة أنه عادة توجد نسبة مئوية غير ناجحة من عمليات إعادة الغلق الآلية auto reclosing operations (ARO) تصل إلى حوالي %(10–5)،

فإنه سيحدث واحد أو اثنين تقريباً من تقطعات الخط الكاملة وهو غير مسموح إطلاقاً في الخطوط الهامة، خطوط 110 kV لها عدد أقل من عمليات قاطع الدائرة. فمثلاً، خط 110 kV، طوله 50 km، وعلى برج ارتفاعه 25 m سيكون له فقط (6–5) مناسبة لتشغيل ARC في السنة وهو مسموح. التقطع الكامل، لهذا الخط سيحدث مرة واحدة كل (4–3) سنة.

خطوط 11 kV على دعائم خشبية لا تتطلب أي حماية إضافية ضد الصواعق فيما عدا التزود بأسلاك أرضية بالقرب من المحطات الفرعية وإقامة مانعات صواعق طراز أنبوب الطرد. كما أشرنا سابقاً في البند ١٢–٨–٣، فإن هذه الخطوط لها عدد صغير من التقطعات بسبب المتانة الدفعية المتزايدة لعزل الدعائم والاحتمالات الأكثر صغراً لتحول الشرر الدفعي إلى أقواس قدرة. مع ذلك، يجب أن نعي أنه بسبب المتانة الدفعية العالية لعزل هذه الخطوط بالنسبة للأرض، تنتج جهود عالية جداً ترحل على هيئة موجات دفعية على كلا جانبي مكان الضربة، وذلك في حالة حدوث ضربة الصاعقة المباشرة على موصلات الخط. وإذا وجد قليل من الدعائم المعدنية في الخط مع دعائم خشبية، فإن الموجات الراحلة عبر الموصلات ستسبب شرر لعزلهم وسوف يتقطع الخط تقريباً مثل خط على دعائم معدنية. لذلك، فإن كل الدعائم المعدنية، الدعائم الناقلة والأماكن الأخرى ذات العزل الضعيف على الخطوط المحملة على دعائم خشبية يجب أن تحمى أساساً بواسطة مانعات صواعق طراز أنبوب طرد.

٣. خطوط 35 kV على دعائم خشبية وبنفس الأسلوب كخطوط 110 kV، لا تتطلب أي إجراءات إضافية للوقاية من الصواعق. بسبب القيم الصغيرة لانحدار التشغيل عبر مسار الشرر، فإن هذه الخطوط تكون أفضل إلى حد ما في مقاومة الصواعق من خطوط 110 kV على دعائم خشبية. الحماية بواسطة مانعات الصواعق طراز أنبوب الطرد للأماكن ذات العزل الضعيف تكون أيضاً مفيدة لهذه الخطوط ولكنها أقل ضرورة من خطوط 110 kV.

خطوط 35 kV على دعائم معدنية تكون بالمثل غير محمية بواسطة الأسلاك الأرضية –خاصة– إذا كانت هذه الخطوط تعمل في نظام مع تعادل معزول له جهاز لإطفاء القوس. في هذه الحالة، تباد آلياً دوائر قصر مفردة الطور إلى الأرض ولا تسبب تقطعات الخط. تقطعات الطورين، التي تحدد عدد تقطعات الخط، تحدث عملياً

نادراً مثل دوائر القصر مفردة الطور في الخطوط مع سلك أرضي، واستخدامها –بهذا الأسلوب– يبدو أقل.

٤. خطوط kV (3–10) في USSR –كقاعدة– تنشأ على دعائم خشبية. هذه الخطوط بالمثل لا تحتاج إجراءات خاصة للوقاية من الصواعق فيما عدا إقامة مانعات صواعق عند الأماكن ذات العزل الضعيف [مثلاً، على دعائم الخرسانة المسلحة أو المعدنية المنفصلة] وبالقرب من المحطات الفرعية.

١٣

حماية المحطات الفرعية والآلات الدوارة من الصواعق

Protection of Sub-Stations & Rotating Machines from Lightning

١٣-١ معلومات عامة General Information

كما ذكرنا في الفصول السابقة، بالنسبة لغالبية خطوط النقل يسمح بعدد كبير نسبياً من الشرر سنوياً. فمثلاً، عزل خطوط 110 kV على الدعائم الخشبية تومض بالشرر مرات قليلة في السنة [لكل 100 km] وأثناء ذلك، نضمن اعتمادية مرضية للإمداد بالكهرباء إلى المستهلكين. وحتى بالنسبة للخطوط الهامة مثل 500 kV لها شرر عزل واحد كل سنتين عبر الطول الكلي 900 km .

مثل هذا العدد الكبير من تدمير العزل يكون غير مسموح تماماً للمحطات الفرعية. فأولاً، شرر العزل عند محطة فرعية يعني دائرة قصر على الموصلات العمومية والتي -حتى مع الوسائل الحديثة للوقاية بالمرحلات- يمكن أن تسبب تدميراً خطيراً للنظام. وثانياً، بالرغم من أنه أثناء إنشاء جهاز نحاول دائماً جعل متانة العزل الداخلي أكثر من العزل الخارجي -فإنه في عملية التشغيل- وبسبب التقدم في العمر الشديد والسريع للعزل الداخلي، فإن هذا التنسيق يمكن أن ينقلب، أثناء فعل الجهود الزائدة ذات الكمية المؤثرة على محطة فرعية بدلاً من الشرر عبر الهواء، يمكن أن يحدث تثقب العوازل الكهربية تدميراً خطيراً للجهاز ككل.

بالرغم من أنه من غير الممكن جعل المحطات الفرعية -بنفس أسلوب الخطوط- مقاومة للصواعق على الإطلاق، فأثناء تنفيذ وسائل الحماية من الصواعق، فإننا نهدف دائماً لضمان احتمال صغير -كلما أمكن- لتدمير عزل المحطات الفرعية. بالنسبة للفكرة الكمية لهذا الاحتمال، يستخدم ما يسمى بـ"دليل مقاومة الصواعق لمحطة فرعية". وهو يساوي العدد المحسوب من السنوات التي أثنائها لا يحدث جهد خطير لعزل المحطة الفرعية. بالنسبة للمحطات الفرعية عالية الجهد الحديثة، فإن دليل مقاومة الصواعق يحسب بمئات وحتى

آلاف السنوات والتي تكون دليل على المحاولات المبذولة بواسطة المصممين لضمان الدرجة الأكبر لمقاومة الصواعق للمحطات الفرعية.

ويجب أن تحمى المحطات الفرعية من كل من ضربات الصواعق المباشرة وأيضاً من موجات الجهد الراحلة من الخط. الحماية من الضربات المباشرة تتم في معظم الحالات بواسطة سواري الصواعق -وعلى نحو أقل تكراراً- بواسطة أسلاك أرضية.

وتنتج الموجات على خطوط النقل بسبب الجهود الزائدة المستحثة، أثناء ضربة صاعقة على موصلات الخط -وأخيراً- بسبب عودة الشرر للموصل من السلك الأرضي أو الدعامة المضروبة بواسطة ضربة صاعقة مباشرة. قوانين التغير مع الزمن للموجات الراحلة في اتجاه المحطة الفرعية يمكن أن تكون مختلفة، ولكن سعتها لا يمكن أن تتعدى جهد شرر عزل الخط بالنسبة للأرض. في الحقيقة، إذا نتجت موجة ذات سعة عالية على خط، فإنها ستسبب -أثناء رحيلها- شرر لعزل الدعائم حتى لا تخفض مقاومة تأريض الدعائم التي يحدث عليها شرر العزل سعة الموجة إلى قيمة جهد شرر العزل. من هذا نرى أن المحطة الفرعية التي يقترب منها الخط المعلق على دعائم خشبية تكون في أسوأ الظروف من وجهة نظر خطورة الجهود الزائدة التي يمكن أن يتعرض لها عزل المحطة الفرعية.

من مقارنة البيانات الخاصة بالفصلين ٦، ١١ نرى أن المتانة الكهربية لعزل الخط تكون دائماً أعلى من فولت اختبار معدة المحطة الفرعية. فمثلاً، لجهد اسمي 110 kV، V_{test} = 460 kV حيث جهد الشرر الدفعي الأدنى لسلسلة من العوازل لها قيمة في حدود 650 kV أي تكون أكثر بـ 40% . لذلك، فإن المحطات الفرعية لا تستطيع العمل باعتمادية بدون وسائل خاصة من الحماية من الموجات الراحلة.

الأجهزة الرئيسية للوقاية من الصواعق للمحطات الفرعية هي مانعات التمور ذو الصمام الآلي، والتي لها جهد انهيار لثغرات الشرر والجهد المتخلف عند تيار kA (10–5) يكون تقريباً 10% أقل من المتانة المضمونة عند موجة كاملة من العزل المراد حمايته.

لذلك فإن الحماية بمساعدة مانعات الصمام الآلي ستكون مؤثرة -وقبل كل شيء- يكون أساسياً الحد من التيار خلال المانعة إلى قيمة kA (10–5) [ويعتمد ذلك على الجهد الاسمي ونوع المانعة]. وإلا، فإن الجهد المتخلف للمانعة سيكون أعلى من الجهد المحدد القياسي والهامش بين الجهد المتخلف للمانعة والمتانة المضمونة للعزل سيكون غير كافي. في حالات منفصلة يمكن أن تدمر المانعة arrestor عند تيارات كبيرة [عشرات الكيلوأمبير] وتشغيل متكرر.

بالنسبة لضربات الصاعقة البعيدة عن المحطة الفرعية [عند مسافات أكبر من km (2–1)]، يمكن أن يكون التيار خلال المانعة مساوياً ضعف تيار الموجة المرتطمة impinging wave، أي $2\left(V_{imp}/Z\right)$. وبشكل خاص، بالنسبة لخط 110 kV فإن تيار المانعة I_{ar} aristro يكون:

$$I_{ar} = \frac{2\times650}{500} = 2.6\ \text{kA}$$

والذي يكون مسموح به كاملاً. بالنسبة للضربات القريبة من المحطة الفرعية، فإن تيار الصاعقة يكون متناسباً عكسياً مع مقاومة التأريض R ومقاومة مانعة الصمام الآلي $R_{v.a}$ auto-valve arrestor، كنتيجة للانعكاسات المتعددة من مكان الضربة والموصل العمومي للمحطة الفرعية. بالنسبة لمحطة فرعية 110 kV:

$$R_{v.a}\frac{V_{resi}}{I} = \frac{367}{10} = 36.7\ \Omega$$

والتيار خلال المانعة I_{ar}:

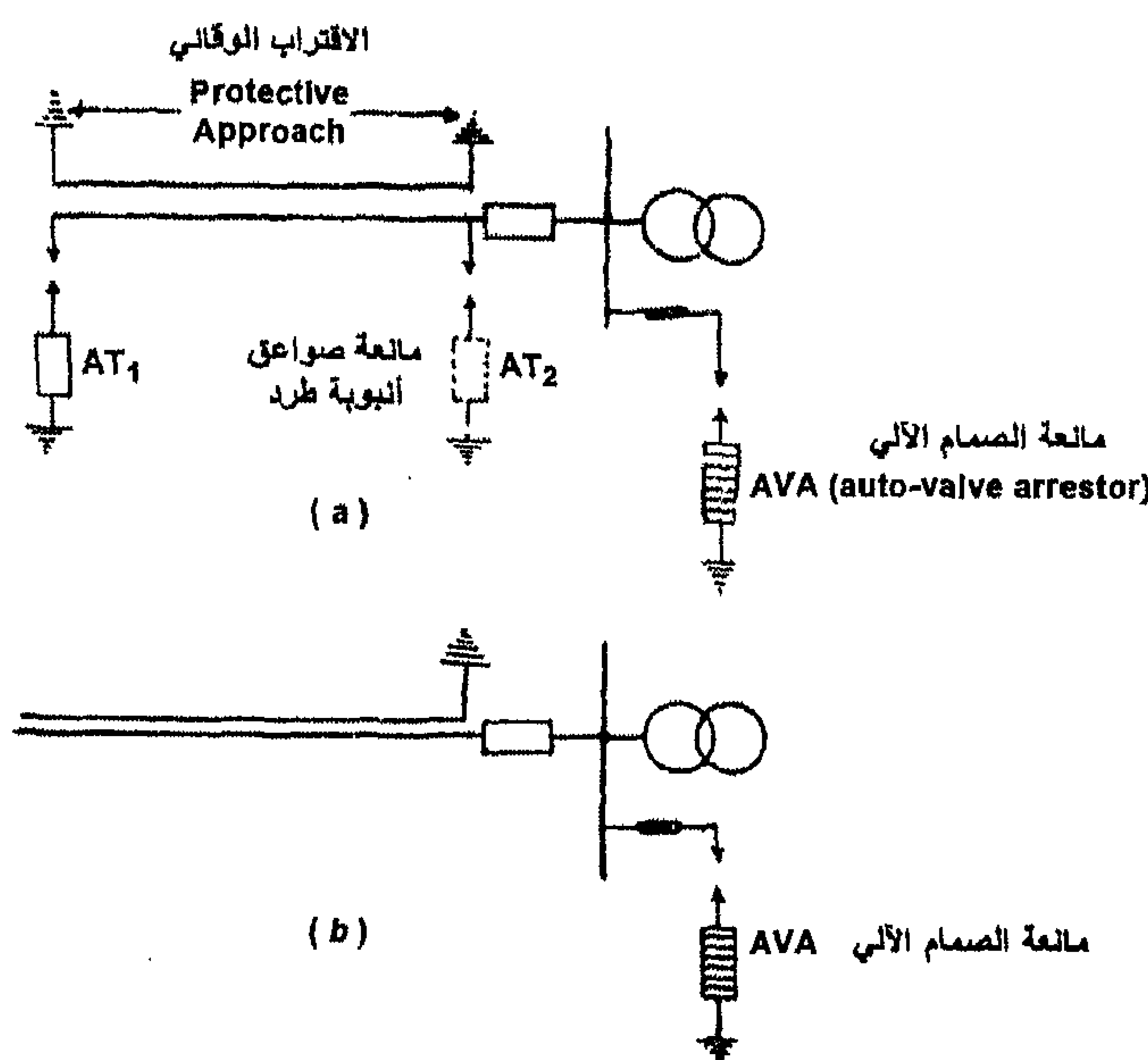
$$I_{ar} = I_M\,\frac{R}{36.7+R}$$

بالنسبة لتيار صاعقة $I_M = 100\ \text{kA}$، ومقاومة تأريض $R = 10\ \Omega$، فإن التيار في المانعة يتعدى 20 kA والذي يكون غير مقبول.

وبالتالي، لكي نضمن أداء ناجح لمانعات الصمام الآلي، يكون من الضروري منع ضربات الصواعق المباشرة على موصل الخط في جوار المحطة الفرعية، أو بأي الأحوال تخفيض احتمالات هذه الضربات. وبوضع هذا الهدف في الاعتبار، فإن قطاع من الخط طوله km (2–1)، والمقترب من المحطة يجب أن يحمى من ضربات الصاعقة المباشرة بواسطة أسلاك أرضية. وإذا تم حماية الخط عبر طوله الكلي، فإن مطالب الحماية من الصاعقة [مقاومة تأريض البرج صغيرة، زوايا صغيرة من حماية السلك الأرضي] تنفذ بعناية خاصة على القطاع القريب مباشرة من المحطة الفرعية.

يؤدي الاقتراب الوقائي وظيفة هامة جداً. فعند المحطات الفرعية، تركب عادة المانعات على الموصلات العمومية. لذلك، يحتفظ دائماً بمسافة محددة بين المانعة والجهاز المراد حمايته. وبتنفيذ ذلك، فإن الجهد على العزل يتعدى الجهد المتخلف للمانعة بكمية تزداد مع الزيادة في المسافة وفي انحدار الموجة الراحلة القادمة من الخط. ولكي تحمي مانعة واحدة محطة فرعية كاملة، من الضروري أن لا يتعدى انحدار الموجة الداخلة قيمة معطاة، وإلا فعند نقط بعيدة من

المحطة الفرعية، يمكن أن يتعدى الجهد على العزل متانته المضمونة. وبسبب وجود اقتراب وقائي، فإن موجة الجهد تصل إلى المحطة الفرعية فقط بعد سريان محدد عبر الخط، يكون نتيجته أن ينخفض انحداره. هذا الموقف، ذو الأهمية الخاصة للمحطات الفرعية عالية الجهد ذات الأبعاد الكبيرة، يسهل خلق الأنظمة التي يعتمد عليها للحماية من الصواعق.



الشكل 13.1: مخطط يوضح مبدأ حماية المحطة الفرعية من الصواعق. (a) خط على دعائم خشبية مع اقتراب وقائي؛ (b) خط مزود بأسلاك أرضية عبر طوله كله

الأنظمة الرئيسية للحماية من الصواعق للمحطات الفرعية معطاة في الشكل 13.1. النظام (a) ينتمي إلى الحالة التي يكون فيها الخط المقترب من المحطة الفرعية محمل على منشآت خشبية بدون سلك أرضي، والذي يكون مزود فقط على الاقتراب الوقائي km (1–2). حيث إن سلك التوصيل من الأسلاك الأرضية إلى التأريض يكون على دعائم خشبية، فإن متانة العزل للدعائم ذات الأسلاك الأرضية بالنسبة لبعضها تكون منخفضة إلى حد ما. فمثلاً، لخطوط 110 kV يتكون العزل من السلسلة والعمود المستعرض الذي طوله حوالي 2 m، أي له متانة في حدود kV (850–900)، والتي تكون تقريباً ثلث جهد الشرر المتوسط للدعائم الخشبية العادية. لذلك، فإن الاقتراب الوقائي يكون مكان عزل ضعيف ولكي لا تسوء مقاومة الصواعق للخط، تركب مانعة صواعق أنبوب طرد AT_1 عند بداية الاقتراب الوقائي على كل طور. وأحياناً

تركب مجموعة ثانية من مانعات صواعق أنبوب الطرد AT_2 ، والتي لا تلعب أي دور هام في الوقاية من الصواعق للمحطة الفرعية وإنما تخدم حماية قاطع-دائرة الخط في تلك الحالات التي يكون فيها مفتوح والخط عند الطرف الآخر تحت جهد.

نظام الحماية من الصواعق للخطوط المحملة على دعائم معدنية محمية بأسلاك أرضية عبر طوله الكلي. تختلف عن النظام في الشكل 13.1(a) فقط في أنه ليس أساسياً تركيب المانعات AT_1 ، AT_2.

ويوضح الشكل 13.1(b) نظام الحماية من الصواعق لمحطة فرعية خطوطها محمية بأسلاك أرضية بطول الخط كله.

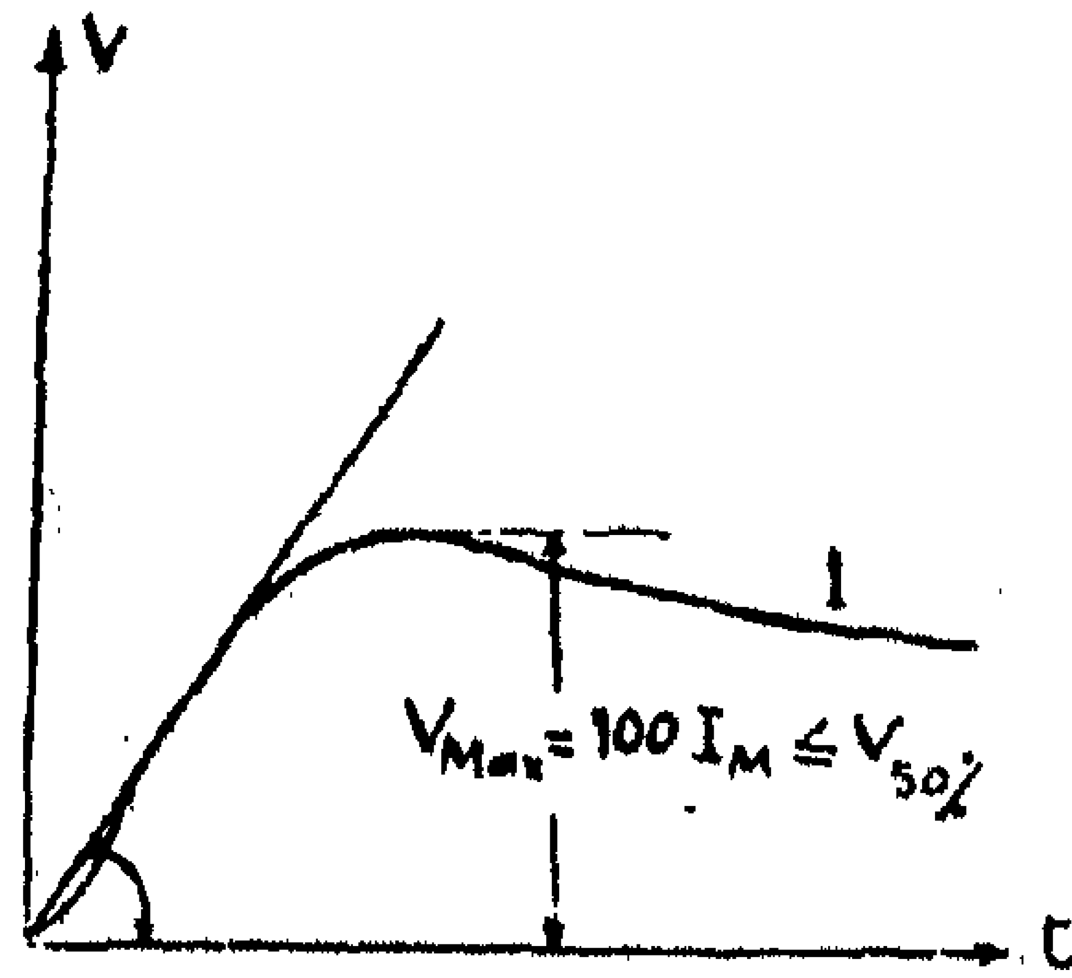
١٣-٢ بارامترات الموجات الراحلة إلى المحطة الفرعية. دليل مقاومة الصواعق للمحطات الفرعية

Parameters of Waves Travelling to the Sub-Station.
Index of Lightning Resistance of Sub-Station

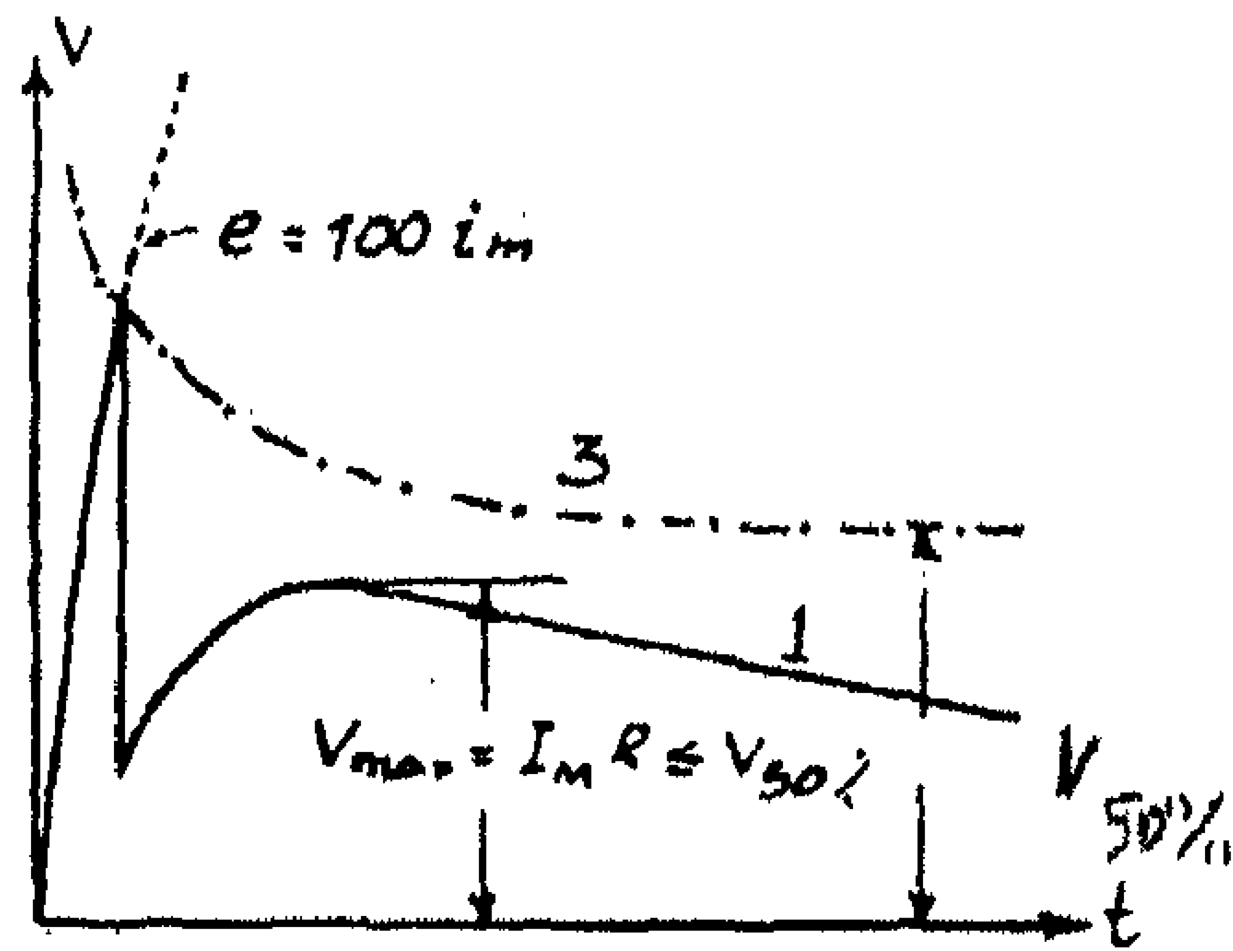
القيمة المحددة للموجات المؤثرة على محطة فرعية تُحدد بالمتانة الدفعية لعزل الخط بالنسبة للأرض داخل حدود الاقتراب الوقائي. وفيما يتعلق بشكل موجة الجهد، فإنها تعتمد على عدد من العوامل.

إذا حدث تفريغ الصاعقة إلى الموصل وكان تيار الصاعقة أقل من المستوى الوقائي للخط، عندئذ تكون سعة الجهد على الموصل مساوية لـ $V_{con} = 100 I_M < V_{50\%}$ ويكرر شكل الموجة شكل موجة التيار [الشكل 13.2(a)]. ويمكن أن يتغير انحدار الموجة داخل حدود واسعة حسب بيانات البنود من ١٢-١ إلى ١٢-٤.

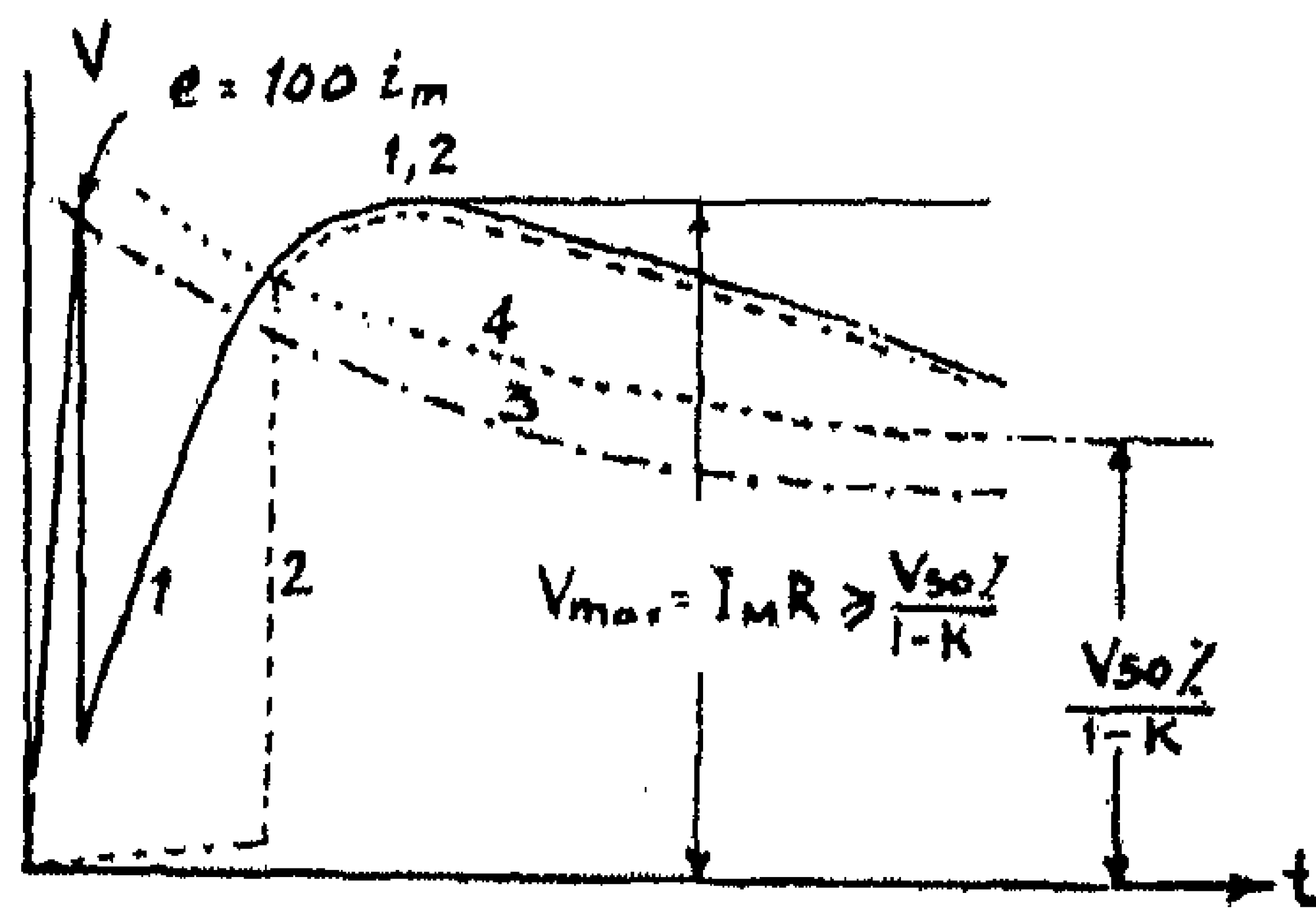
وإذا حدثت الضربة بالقرب من البرج وكان تيار الصاعقة أكبر من المستوى الوقائي للخط، فإن الجهد على الموصل المضروب يتغير بالأسلوب الموضح في الشكل 13.2(b). ذروة الزمن القصير الأولى للجهد لا تلعب أي دور مهم، حيث إنها تخمد بالكامل تحت تأثير الكورونا أثناء الحركة عبر الاقتراب الوقائي. النهاية العظمى الثانية للجهد تزيد قليلاً من هبوط الجهد $I_M R$ في مقاومة التأريض بسبب تواجد محاثة البرج. وعند تيار كبير بدرجة كافية، عندما $I_M R(1-K) > V_{50\%}$ ، فإن شرر عزل الموصل الثاني يحدث ويبين الشكل 13.2(c) الجهد عليه. وكما نرى، في هذه الحالة يحدث ارتفاع حاد في الجهد على الموصل، ذروته [ارتفاع الجهد] -في النهاية- يمكن أن يصل إلى قيمة جهد شرر العزل.



(a)



(b)



(c)

الشكل 13.2 : أشكال الموجة في حالة ضربة مباشرة لموصل أثناء الزيادة المتعاقبة لتيار الصاعقة. (1) الجهد على الموصل المضروب؛ (2) الجهد على الموصل المجاور؛ (3) خصائص الجهد–ثانية لعزل الخط؛ (4) خصائص الجهد–ثانية الإحداثي الرأسي له مضروب في $\frac{1}{1-K}$

أثناء ضربة الصاعقة في دعامة معدنية أو في السلك الأرضي، يظهر الجهد على موصل فقط أثناء شرر العودة، لذلك يكون له دائماً جبهة front شديدة الانحدار [حادة] كما في الشكل 13.2(c).

من كل ما سبق، نرى أن سعة وانحدار الجهد على موصل عند مكان ضربة الصاعقة في الخطوط يمكن أن يتغير داخل حدود واسعة وسيكون من الصعب اعتبار كل تغيرات الموجات. لذلك عند توقيت تحليل الحماية من الصواعق لمحطة فرعية، تؤخذ الفروض التالية التي تعطي هامش معين من الاعتمادية كأساس:

١. كل تفريغات الصواعق تسبب مظهر على موصل ذلك الجهد، وهو أنه بعد الوصول إلى المحطة الفرعية، سيكون للموجة سعة مساوية لجهد الشرر الأدنى لعزل الخط عند الاقتراب.

٢. كل تفريغات الصواعق تؤدي إلى ظهور موجة ذات جبهة انحدار حادة على الموصل عند مكان الضربة. هذه الجبهة الحادة تُنَعَّم تحت تأثير الكورونا أثناء حركة الموجة عبر الخط. لذلك، فإذا حدث تفريغ الصاعقة عند مسافة x من محطة فرعية، فإن الموجة المؤثرة على المحطة الفرعية سيكون لها جبهة مكافئة تساوي Δt وانحدار a:

$$a = \frac{V_{50\%}}{\Delta t} = \frac{V_{50\%}}{\gamma x} \qquad (1.13)$$

وعلى أساس هذه الفروض، لا يكون من الصعب تقدير دليل مقاومة الصاعقة للمحطات الفرعية بطريقة بسيطة.

نفترض -مثلاً- أن مانعة الصمام الآلي المركبة في المحطة الفرعية تضمن حماية معدة كاملة، إذا كانت الموجة المؤثرة على المحطة الفرعية لها سعة تساوي $V_{50\%}$، انحدار $a_v \le a_{v.er}$. في هذه الحالة تحدث كل ضربات الصواعق عند مسافة:

$$x_{er} \ge \frac{V_{50\%}}{\gamma a_{v.er}}$$

من المحطة ستكون عديمة الخطورة. وإذا تم حماية الخط بأسلاك أرضية عبر طوله الكلي أو طول الاقتراب الوقائي $l \ge X_{er}$، فإن الموجات الخطيرة على المحطة الفرعية يمكن أن تنشأ فقط أثناء قطع الصاعقة خلال حماية السلك الأرضي وأثناء عودة الشرر من السلك الأرضي إلى الموصل. وحسب بيانات الفصل ١٢، فإن عدد تلك الحالات في السنة سيكون مساوياً للآتي:

$$N_1 = 1.8h\frac{X_{er}}{100}\left(v_{\alpha} + 0.5V_{flash_1} + 0.5V_{flash_2}\right) \quad (2.13)$$

حيث V_{flash_1}، V_{flash_2}= احتمال الشرر الراجع أثناء ضربه لبرج وفي سلك أرضي في منتصف الباع.

إذا كان الخط محمي بأسلاك أرضية عند الاقتراب فقط، طوله $l < X_{er}$، ستنتج بالمثل موجات خطرة أثناء ضربة الموصلات على الخط فيما وراء حدود الاقتراب الوقائي على طول $(x_{er} - l)$. وسيكون العدد الكلي للموجات الخطرة على عزل المحطة الفرعية مساوياً للآتي:

$$N_2 = 1.8h\frac{l}{100}\left(V_{\alpha} + 0.5V_{flash_1} + 0.5V_{flash_2}\right)$$
$$+1.8h\left(\frac{x_{er} - l}{100}\right) \quad (3.13)$$

وحيث إنه في الخطوط ذات الأسلاك الأرضية تكون احتمالات الشرر V_{flash_1}، V_{flash_2} واحتمالات الفصل خلال v_{α} صغيرة جداً، فإن الحد الثاني، أي الضربات على القطاع غير المحمي للخط، يكون ذو أهمية أساسية في المعادلة (13.3) للقيم الكبيرة من $(x_{er} - l)$.

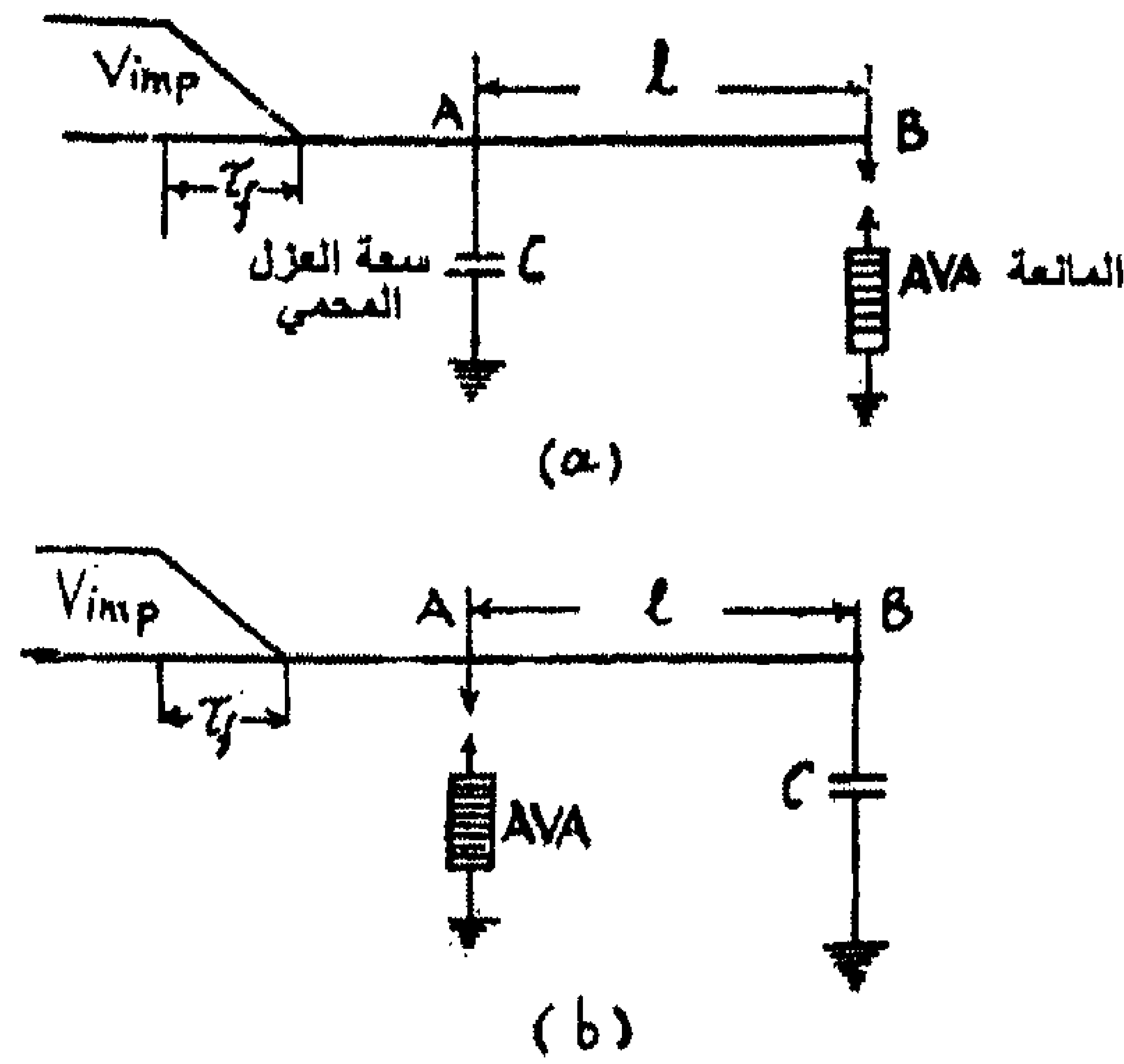
وبهذا الأسلوب، فإن دليل مقاومة الصواعق لمحطة فرعية يعتمد إلى حد كبير على قيمة الانحدار المسموح للجهد، ولتحديده يكون أساسياً البحث في الدائرة المكافئة للمحطة الفرعية.

١٣-٣ الجهد على عزل المحطة الفرعية في أبسط الدوائر المكافئة

Voltage on the Insulation of Sub-Station in Simplest Equivalent Circuits

قبل اعتبار الدوائر عالية التعقيد للمحطات الفرعية الحقيقية، يكون مطلوب تحليل الدوائر المكافئة الأبسط الموضحة في الشكل 13.3(a)، 13.3(b). والتي تحتوي على كل العناصر الرئيسية: خط الاقتراب، المانعة، سعة العزل المراد حمايته وسلك توصيل طوله l [قطاع الموصلات العمومية للمحطة الفرعية] بين المانعة والجهاز المحمي. تحليل هذه الدوائر، ينفذ ببساطة نسبية، تسمح بإنشاء عدد من القوانين الهامة، الحقيقية في إيجاز عام، للمحطات الفرعية الحقيقية أيضاً.

سنفحص أولاً دائرة الشكل 13.4 التي تلعب دوراً مساعداً، وفيها تكون المانعة موصلة في ملتقى خطين ذو معاوقة تمور Z_1، Z_2 وسنفترض أن خصائص الفولت–أمبير للمانعة arrestor وهو $V_{ar} = f\,(I_{ar})$ معطى بواسطة منحنى.



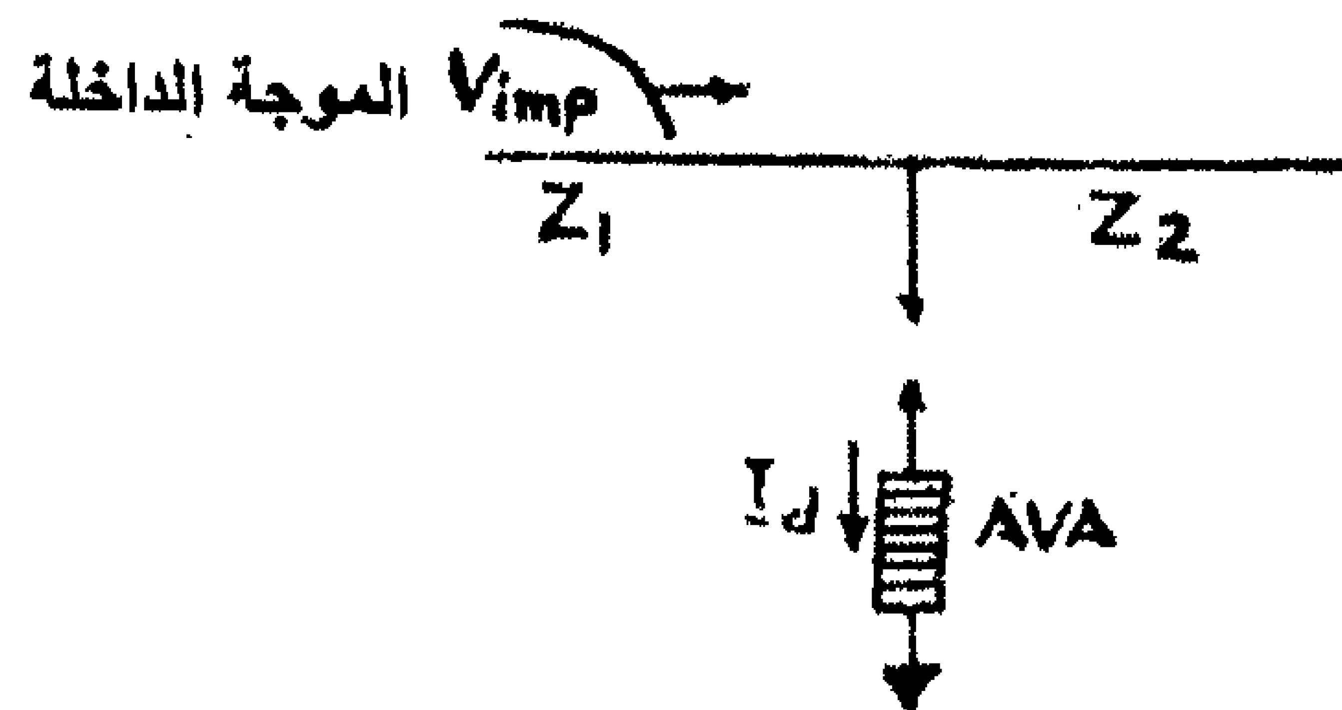
الشكل 13.3: الحالات النموذجية للموقع المتبادل للمانعة والعزل المراد حمايته

بعد انهيار ثغرة شرر المانعة ، تعطى الجهود والتيارات في دائرة الشكل 13.4 بالعلاقة :

$$2V_{imp} = V_{ar} + \left(\frac{V_{ar}}{Z_2} + I_{ar}\right) Z_1$$

أو

$$\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} V_{imp} = V_{ar} + I_{ar} \frac{Z_1 Z_2}{Z_1+Z_2} \tag{4.13}$$



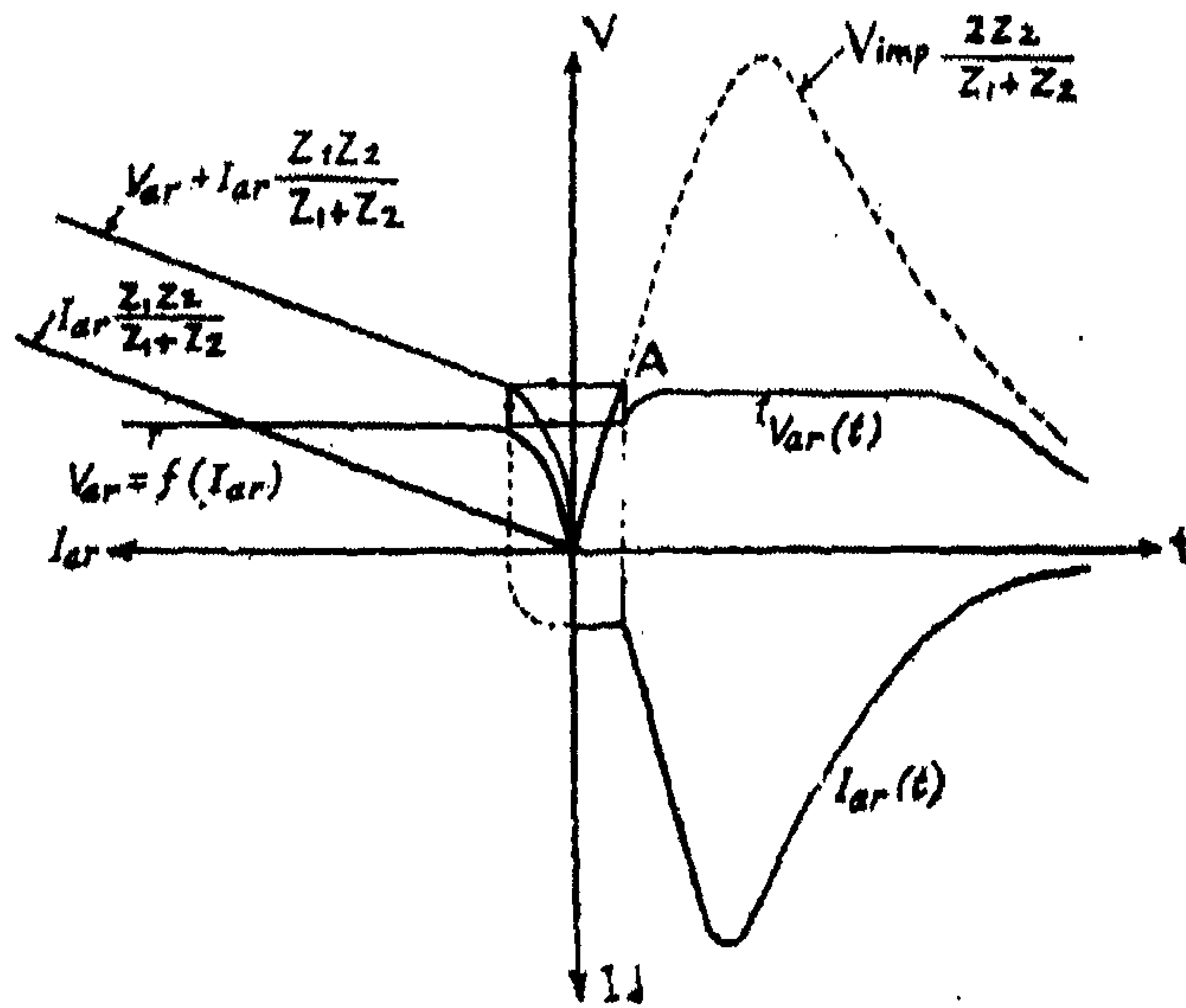
الشكل 13.4: فعل الموجة على مانعة الصمام الآلي

بسبب وجود حد غير خطي $V_{ar} = f(I_{ar})$ فإن هذه المعادلة يجب أن تحل بيانياً بمساعدة التركيب الموضح في الشكل 13.5، والذي فيه في الربع الأيسر في الإحداثيات I_{ar} ، V_{ar} خصائص الفولت–أمبير للمانعة ، الخط المستقيم $I_{ar}(Z_1Z_2/Z_1+Z_2)$ ومجموع هذه المكونات ، أي الجانب الأيمن للمعادلة (13.4) منشأ. في الربع الأيمن العلوي تكون الموجة

الداخلة V_{imp} مضروبة في معامل الانكسار منشأة

$$\alpha_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

الجهد على المانعة حتى انهيار ثغرات شرر المانعة يكون مساوياً لـ $\alpha_{12} V_{imp}$. وتحدد لحظة الانهيار بواسطة نقطة تقاطع المنحنى $\alpha_{12} V_{imp}$ وخصائص الفولت–أمبير للمانعة [النقطة A في الشكل 13.5]. بعد ذلك تتحقق المعادلة (13.4) جيداً والجهد على المانعة بعد الانهيار، يمكن إيجاده بواسطة الإنشاء البسيط الموضح في الشكل 13.5. التيار في المانعة، الموضح في الربع الأيمن السفلي من الشكل 13.5 يمكن إيجاده أيضاً في آن واحد.



الشكل 13.5: الإنشاء البياني للجهد V_{ar} على المانعة والتيار I_{ar} خلال المانعة للشكل 13.4

من الشكل 13.5، نرى أنه بسبب خصائص $V - I$ غير الخطية، فإن الجهد على المانعة يبقى عملياً ثابتاً عبر مدى كبير من تغير جهد الموجة الداخلة بالرغم من أن التيار في المانعة يتغير بشكل محسوس أثناء ذلك.

والآن سنأتي مباشرة لتحليل الدائرة الأبسط لشكل 13.3 والتي تناظر نظام تشغيل الطرف الهامد [غير المكهرب] للمحطة الفرعية، حيث يوجد خط واحد فقط في هذه الدوائر تقترب من خلاله الموجة الدفعية V_{imp} إلى المحطة الفرعية. وللتبسيط، سوف نفترض أن V_{imp} هي موجة ذات جبهة مائلة بزاوية.

وفي البداية سنفحص دائرة الشكل 13.3(a) وسنفترض أن سعة العزل C تساوي صفر ومعاوقة التمور للخط المقترب Z تساوي معاوقة تمور الأسلاك الموصلة [الموصلات العمومية للمحطة الفرعية]. وعلى ذلك فإن انعكاس الموجة لن يحدث عند النقطة A والجهد على المانعة يمكن الحصول عليه بمساعدة إنشاء مماثل لذلك الموجود في الشكل 13.5 ولكن مع $Z_1 = Z$ ، $Z_2 = \infty$. الجهد على المانعة وبالمثل الموجة الداخلة V_{imp} يتم إيجادها بمساعدة الإنشاء الموضح في الشكل 13.6(a). الفرق:

$$V_{ref} = V_{ar} - V_{im}$$

هو الموجة المنعكسة التي ستذهب بعيداً عبر الخط من المانعة في الاتجاه المعاكس. في الشكل 13.6(a)، منحنى تغير الموجة المنعكسة مع الزمن يكون موضحاً. وله إشارة موجبة حتى زمن انهيار المانعة وبعد بعض الوقت بعد الانهيار يكون له إشارة سالبة.

بعد زمن $2\tau = 2l/v$ بعد وصول الموجة الداخلة عند النقطة A ، فإن الموجة المنعكسة من طرف الخط ستصل النقطة A وسوف تركب على الموجة الداخلة بالأسلوب الموضح في الشكل 13.6(b).

وإذا رمزنا إلى جهد تفريغ المانعة بالرمز V_{op}، زمن التثقب بـ t_{op} وانحدار الموجة الداخلة بـ a_v فإن:

$$V_{op} = 2a_v t_{op}$$

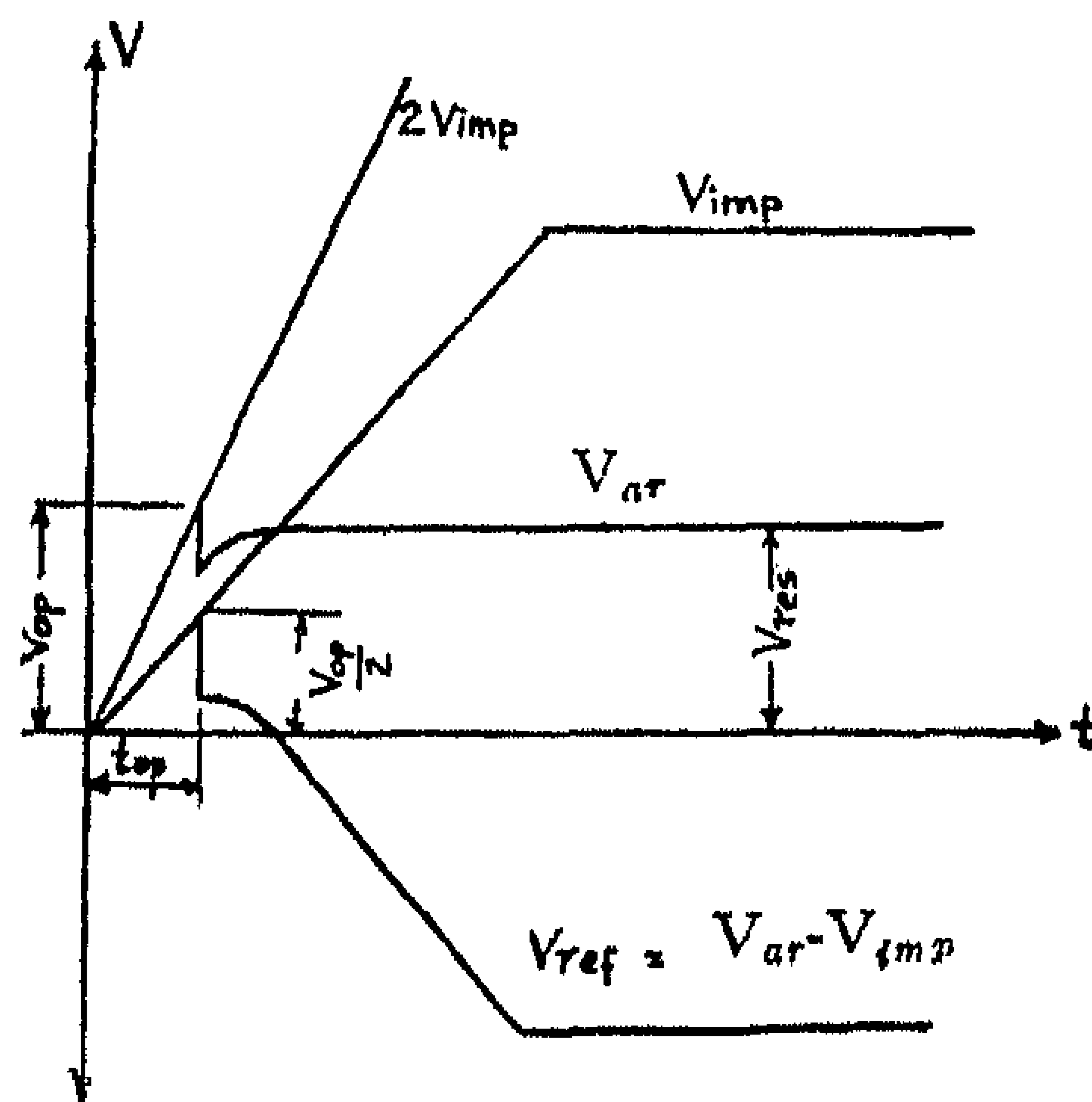
ويكون للموجة المنعكسة القيمة الموجبة الأكبر عند اللحظة t_{op} [الشكل 13.6(a)]. وبالتالي، يكون أقصى جهد على العزل [الشكل 13.6(b)]:

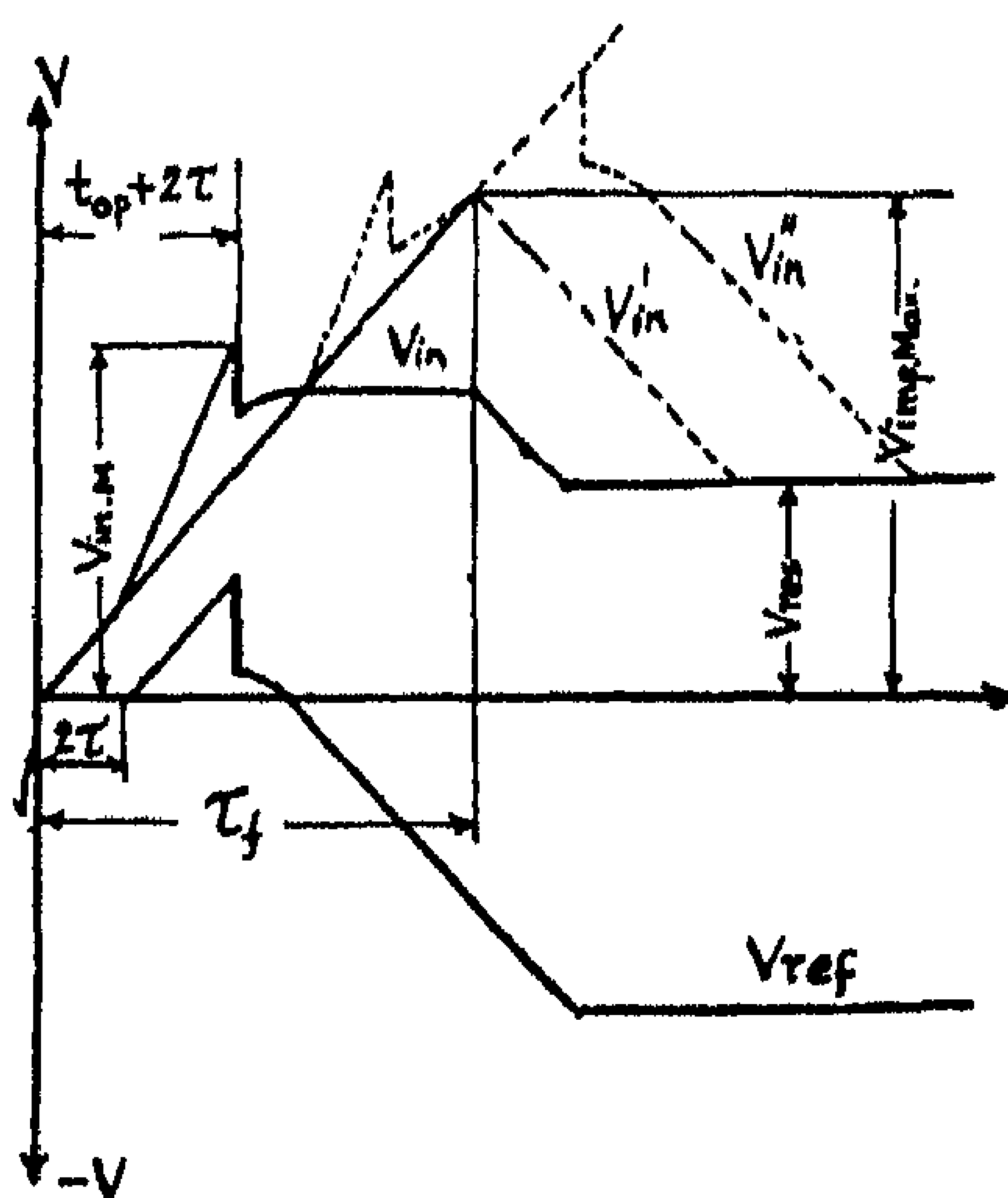
$$V_{ins_{max}} = a_v \left(t_{op} + 2\tau\right) + V_{op/2} = V_{op} + 2a_v \tau \qquad (5.13)$$

وتبين هذه العلاقة أنه في الحالة المعطاة فإن أقصى جهد على العزل المراد حمايته يتعدى جهد تشغيل المانعة بقيمة $2a_v \tau = 2a_v l/v$ تتناسب مع انحدار الموجة المرتطمة impinging والمسافة l.

في الشكل 13.6(b) منحنيات الجهد على العزل لقيم أخرى من v موضحة بخطوط منقطة. ويجب أن نتذكر أن المعادلة (13.5) قابلة للتطبيق فقط في حالة:

$$\left(2\tau + t_{op}\right) < \tau_f$$





الشكل 13.6: منحنيات الفولت V_{ar} على المانعة، V_{ins} على العازل المراد حمايته في منحنى الشكل 13.3(a) عند $C = 0$ وقيم مختلفة من $\tau = l/v$

إذاً $2\tau > \tau_f$

فإن:

$$V_{ins_{max}} = V_{imp_{max}} + V_{op/2} \qquad (6.13)$$

من هذه العلاقة، من الواضح أن الشرط $2\tau > \tau_f$ لا يمكن أن يحدث في الدوائر الفعلية – حيث–أثناء ذلك– يتعدى أقصى جهد على العازل سعة الموجة المرتطمة –التي–كما أشرنا

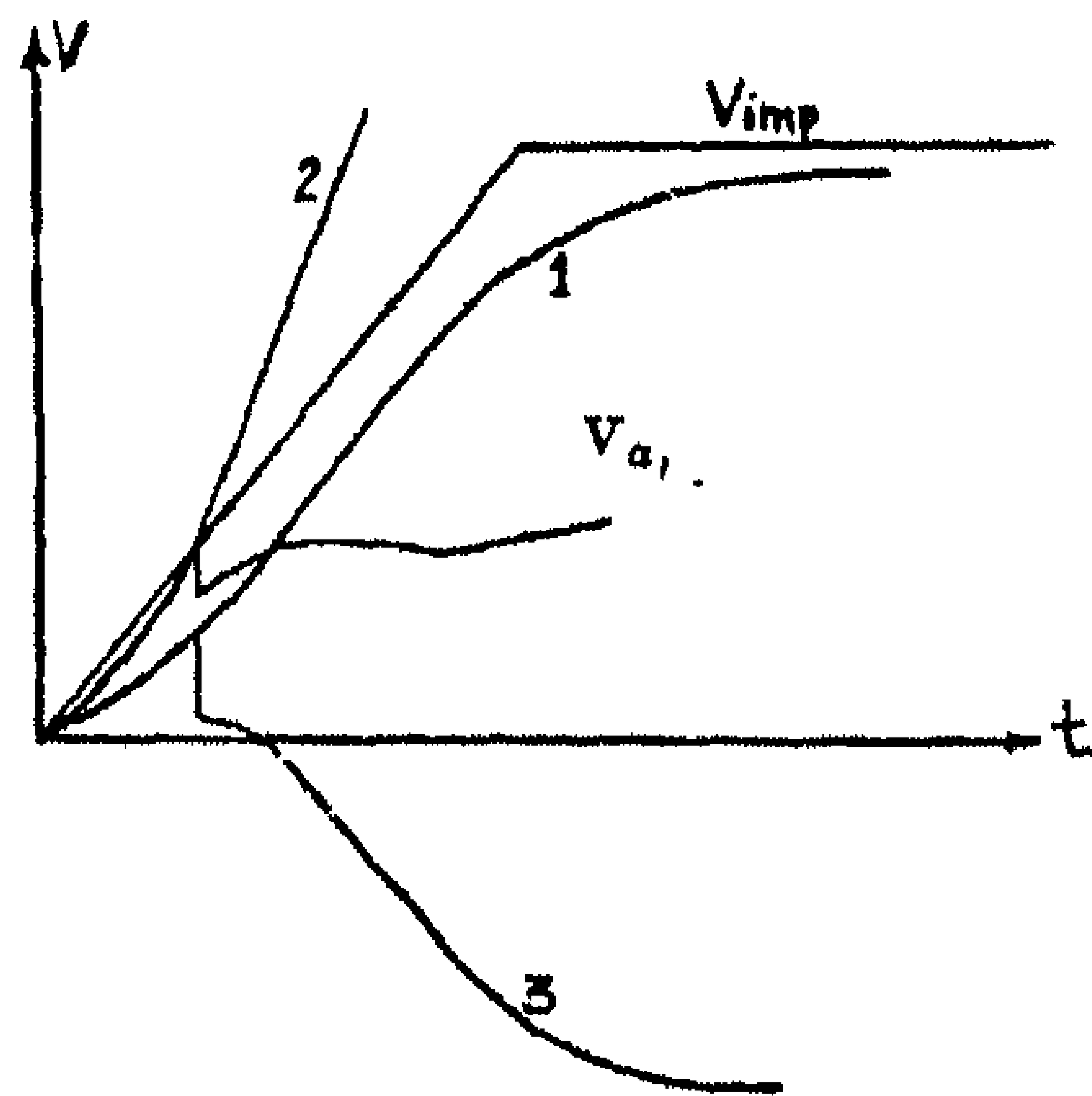
سابقاً– يمكن أن تكون أكبر من الجهد المسموح لعزل المحطة الفرعية. ومن هنا فإن 2τ تكون دائماً أقل من τ_f وتكون المعادلة (13.5) قابلة للتطبيق.

والآن سوف نعتبر كيفية تأثير السعة C للجهاز المراد حمايته على نظام الشكل 13.3(a). الموجة المرتطمة، بعد مرورها خلال السعة، تصل إلى المانعة بجبهة ناعمة، كما هو مبين في الشكل 13.7(a)، حيث معطى أيضاً الجهد على المانعة والموجة المنعكسة من المانعة، موقعة بيانياً. وبعد الوصول إلى النقطة A، فإن هذه الموجة المنعكسة ستنعم أيضاً بواسطة السعة ويمكن الحصول على الشكل المحصل لهذه الموجة بمساعدة طريقة المماس للمماسات. وبعد تركيبها على الموجة المرتطمة، فإن هذه الموجة تعطي جهد على السعة كما هو مبين في الشكل 13.7(b) لقيم مختلفة من 2τ.

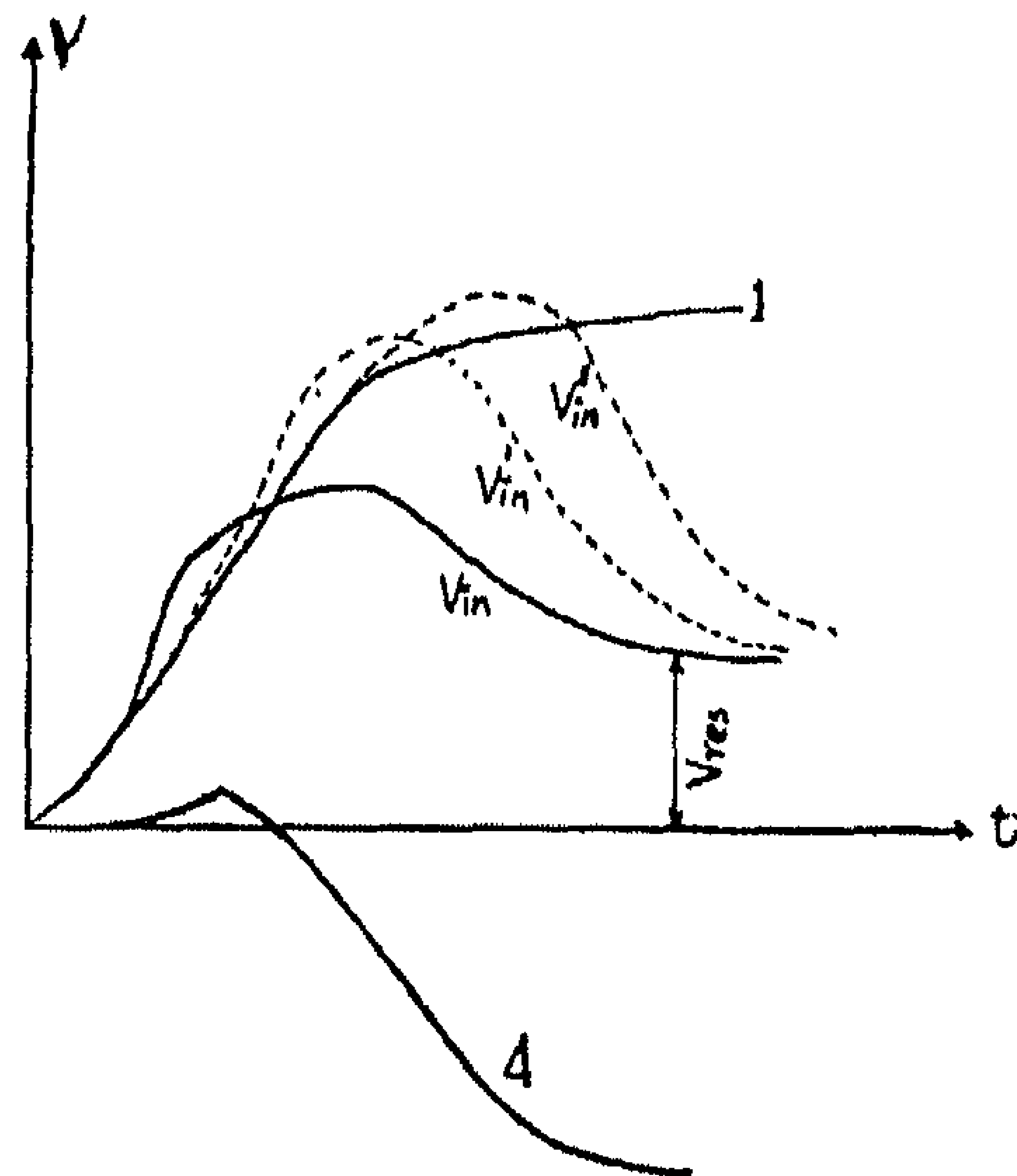
وكما يمكننا أن نرى من مقارنة الأشكال 13.6(b)، 13.7(b) فإن السعة C تنعم جهد الذروة على الهدف المراد حمايته قليلاً. وهذه الذروة تقابل لحظة تشغيل مانعة الصمام الآلي – ومع ذلك– فإن سعة الجهد على العزل تنخفض بسبب وجود سعة، وخاصة عند القيم الصغيرة لـ τ والتي –كما أشرنا– تحدث في الدوائر الحقيقية للوقاية من الصواعق للمحطات الفرعية. لذلك، فإن أقصى جهد على العزل حتى في وجود السعة يمكن تحديده بهامش صغير من الأمان من المعادلة (13.5).

والآن دعنا نأتي لتحليل أنظمة الشكل 13.3(b) وفي البداية سنبحث الحالة عندما تكون سعة العزل المراد حمايته يساوي صفر. هذا النظام يعتبر أكثر صعوبة في الحسابات عن النظام السابق، حيث يجب اعتبار انعكاسات متعددة للموجة على القطاع AB. بالنسبة لـ $C = 0$، تكون الموجة المنعكسة لها نفس الشكل والسعة الخاصة بالموجة المرتطمة وعند النقطة A – حيث المانعة لها خصائص غير خطية– يمكن إيجاد الموجات المنعكسة بمساعدة إنشاء بياني مماثل لذلك المعطى في الشكل 13.5. نتائج الإنشاء البياني لنظام الشكل 13.3(b) لـ $C = 0$ تكون معطاة في الشكل 13.8.

كما هو واضح من الشكل، وبسبب خصائص الفولت–أمبير غير الخطية للمانعة فإن الفولت عليها –بالرغم من الانعكاسات المتعددة– يبقى عملياً بدون تغيير. لذلك، تتصرف المانعة مثل مصدر فولت ثابت وتحدث الانعكاسات من المانعة مع تغير الإشارة. الفولت على العزل له شكل الذبذبات ويحدث حول قيمة الفولت المتخلف على المانعة. مدة دورة التذبذب $T = 4\tau = 4l/v$ تكون خاصية للخط المفتوح عند الطرف.



(a)



(b)

الشكل 13.7 : منحنيات الجهد V_{ar} على المانعة، V_{ins} على العازل المراد حمايته في مخطط الشكل 13.3(a) لـ $C \neq 0$ وقيم مختلفة من $\tau = l/v$. (1) موجة تضرب المانعة؛ (2) موجة ذات سعة مضاعفة تضرب المانعة؛ (3) الموجة المنعكسة من المانعة؛ (4) الموجة المنعكسة من المانعة والتي تنعمت بالسعة

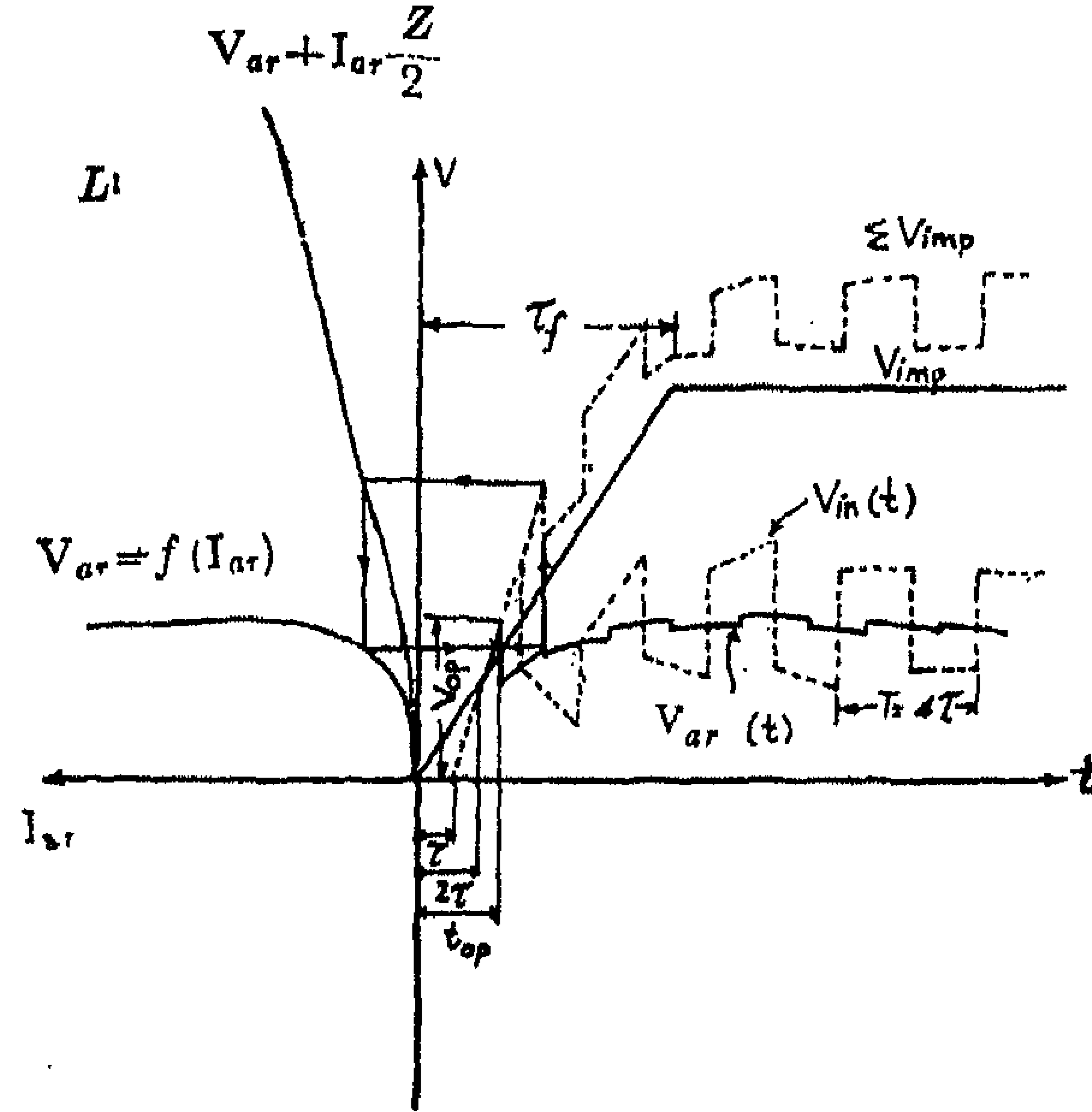
إذاً -كما في الشكل 13.8- شغلت مانعة الصمام الآلي بعد وصول الموجة المنعكسة من الطرف المفتوح للخط $(t_{op} > 2\tau)$، يكون أقصى جهد على العزل هو:

$$V_{ins_{max}} = V_{op} + 2a_v \tau$$

أي مماثل لذلك الخاص بنظام الشكل 13.3(a).

وإذا شغلت المانعة قبل وصول الموجة المنعكسة $(t_{op} < 2\tau)$ فإن:

$$V_{ins_{max}} = 2V_{op}$$



الشكل 13.8 : الإنشاء البياني للجهد V_{ar} على المانعة، V_{ins} على العزل لمخطط الشكل 13.3(b)، $C = 0$، ΣV_{imp} = مجموع الموجات المرتطمة على العزل من كلا الجانبين

وسنفحص الآن نظام الشكل 13.3(b)، مع اعتبار سعة الهدف المراد حمايته. الإنشاء البياني للفولت على المانعة والسعة يكون ممكناً في هذه الحالة أيضاً، وهو ينفذ بمساعدة طريقة ظل المماسات. حتى وبدون تنفيذ هذا الإنشاء من الممكن التنبوء بأن الجهد على المانعة -بنفس الطريقة كما في النظام بدون سعة- سيبقى ثابت تقريباً. وسيحتفظ الفولت على السعة بخاصية تذبذبية، ولكن هذه الذبذبات ستنعم وستكون قريبة من جيبية مثبطة، وتركب على الفولت المتخلف. ولكي نحدد أقصى جهد على السعة في هذه الحالة، بدون اللجوء إلى إنشاء بياني، سنستبدل قطاع الموصل العمومي الذي طوله l بسعة عند نهاية الكنتور المتذبذب. وحيث في الحالات العملية، تكون نسبة سعة العزل إلى سعة الأسلاك الموصلة دائماً أكبر من اثنين، فإن الكنتور المتذبذب يجب أن يتكون من سعة C ومعاوقة الأسلاك الموصلة. التردد الطبيعي لتذبذب هذا الكنتور يكون مساوياً للآتي:

$$\text{التردد الطبيعي} = \frac{1}{\sqrt{L_L C}} = \frac{1}{\sqrt{Z \tau C}}$$

حيث

$$L_L = \frac{l Z}{v} = Z \tau$$

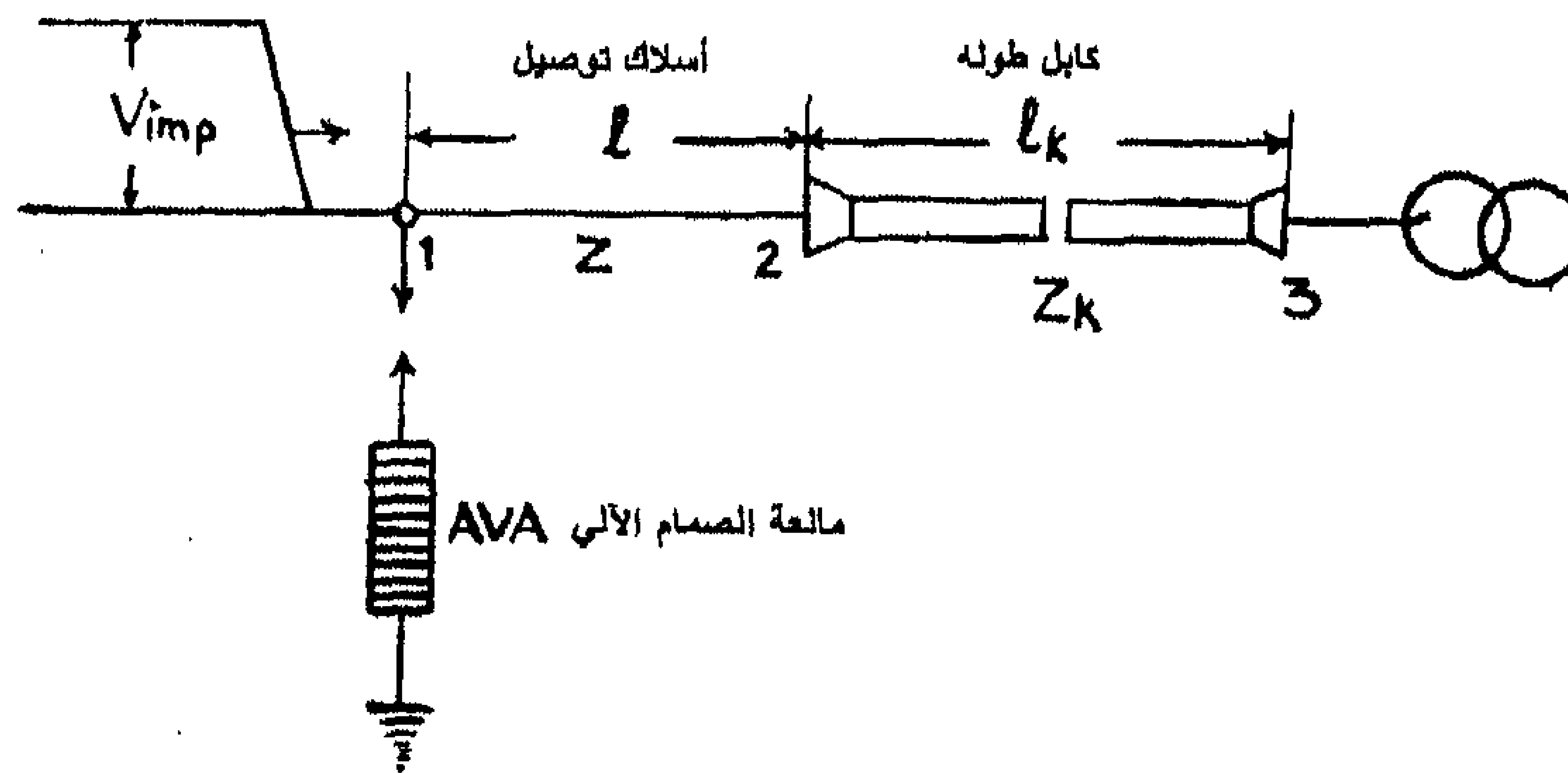
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\tau\sqrt{\frac{T_C}{\tau}} = 2\pi\sqrt{C Z \tau} \qquad (7.13)$$

حيث T= فترة الذبذبة.

٤-١٣ الجهد على العزل في أبسط دائرة تحتوي على كابل طويل

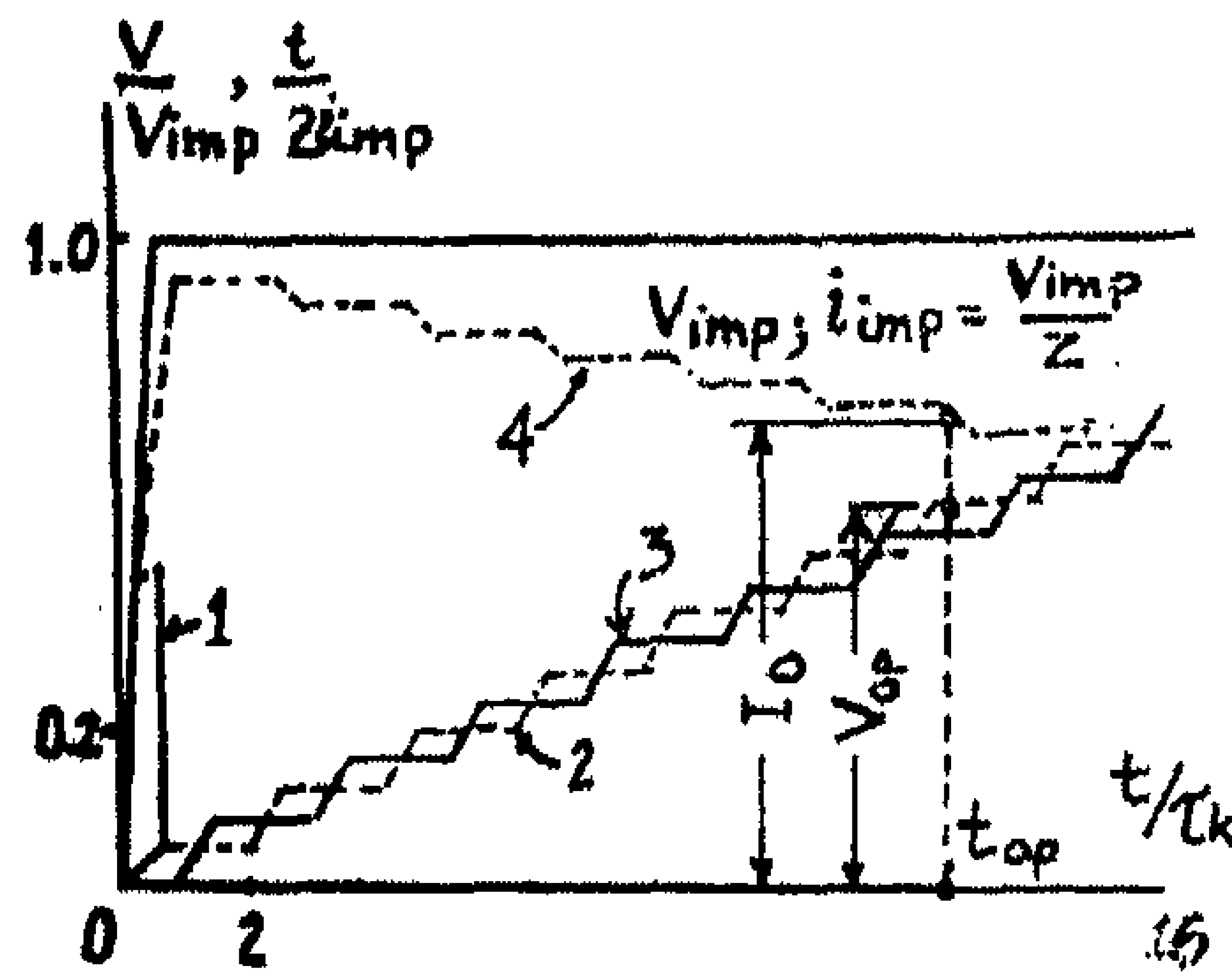
Voltage on the Insulation in the Simplest Circuit Containing a Long Cable

حديثاً –وخاصة في المحطات الهيدروكهربية– يتزايد استخدام توصيل المحولات مع معدة توزيع مفتوحة بواسطة كابلات ذات طول يبلغ مئات قليلة من الأمتار. الدائرة الأبسط لهذه الحالة معطاة في الشكل 13.9.



الشكل 13.9: مخطط مبسط لمحطة فرعية المحول فيها موصل بمعدة توزيع بواسطة كابل طويل

ليس من الصعب الاقتناع بأنه في هذا النظام أيضاً، ستحدث انعكاسات متعددة للموجات في الكابل الذي طوله l_k، وأيضاً في أسلاك التوصيل التي طولها l. حسابات هذه الانعكاسات المتعددة تكون ممكنة، ولكنها تكون مستفيضة جداً وأقل بيانياً. ومن هنا في الحالة تحت الاعتبار أيضاً، يكون مطلوب استغلال دائرة مكافئة. ولكي نركبها بشكل صحيح –سندرس البدء بالانعكاسات المتعددة في النظام عندما تكون ثغرات شرر المانعة لم تفصل [تكسر] بعد. وحيث إن أي محول في الحالة العابرة يعني حمل غير محسوس، فإن الكابل يمكن اعتباره مفتوح الدائرة وحسابات هذه الدائرة يمكن أن تنفذ ببساطة جداً بمساعدة طريقة الخصائص.



الشكل 13.10: مخطط الجهد عند نقط مختلفة من مخطط الشكل 13.11 والتيار في الخط [المانعة لا تعمل]. (1) الفولت عند مكان تركيب المانعة؛ (2) الفولت عند بداية الكابل؛ (3) الفولت عند نهاية الكابل؛ (4) التيار في الخط

في الشكل 13.10، موضح نتائج هذا الحساب لحالة خاصة وهي أن الآتي معطى: $Z_k/Z = 0.05$ ، $\tau_f = 0.5\tau_k$ ، $\tau = 0.1\tau_k$. هذه النسب يمكن –مثلاً– أن تقابل القيم الحقيقية: $Z_k = 25\ \Omega$ ، $Z = 500\ \Omega$ ، $\tau_f = 2\ \mu\ \text{sec.}$ ، $l_k = 600\ \text{m}$ ، $l = 120\ \text{m}$.

من المخططات البيانية نرى أن الجهود عند بداية ونهاية الكابل تكون عملياً متساوية وتزداد ببطء شديد بالتناسب مع شحن السعة. الجهد عند مكان تركيب المانعة يكون في البدء مساوياً للموجة المرتطمة، بعد وصول الموجة المنعكسة من الكابل، تبقى عملياً ثابتة لبعض الوقت، وبعد نهاية جبهة الموجة المرتطمة، تهبد بحدة وتصبح عملياً مساوية للجهد عند بداية الكابل. لذلك، فإن ثغرات شرر المانعة تنكسر إما عند بداية العملية أو بعد عدد كبير من الانعكاسات، عندما يكون الجهد عند الثلاث نقاط التي تهمنا متساوي عملياً. وسوف نقدر احتمال انهيار ثغرات شرر المانعة عند زمن صغير. ولهذا من الواضح أنه من الأساسي أن:

$$a_v\,\tau = a_v\,\frac{l}{v}$$

كان أكبر من V_{op}. ولكن انحدار الموجة المرتطمة، سعتها وطول الجبهة تكون متصلة بالنسبة:

$$a_v = \frac{V_{imp}}{\tau_f}$$

وبالتالي، فإن المانعة ستعمل عند:

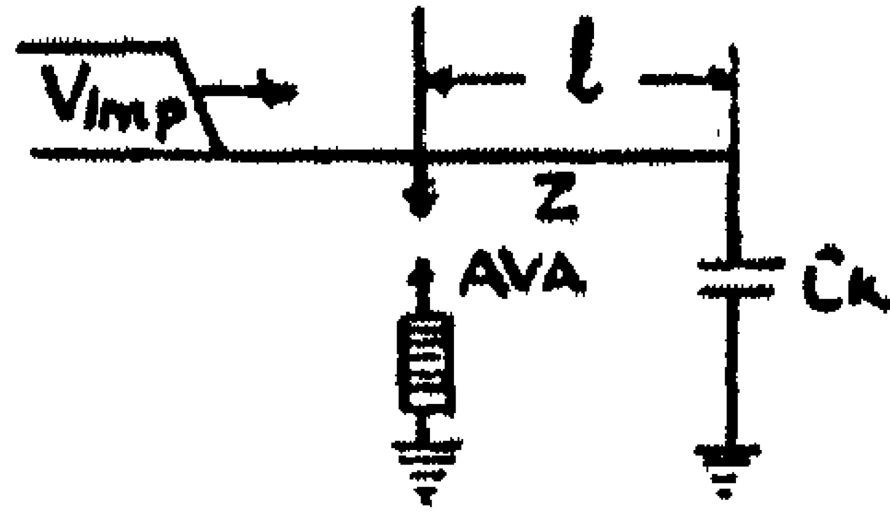
$$l > \frac{v\,v_f\,V_{op}}{V_{imp}}$$

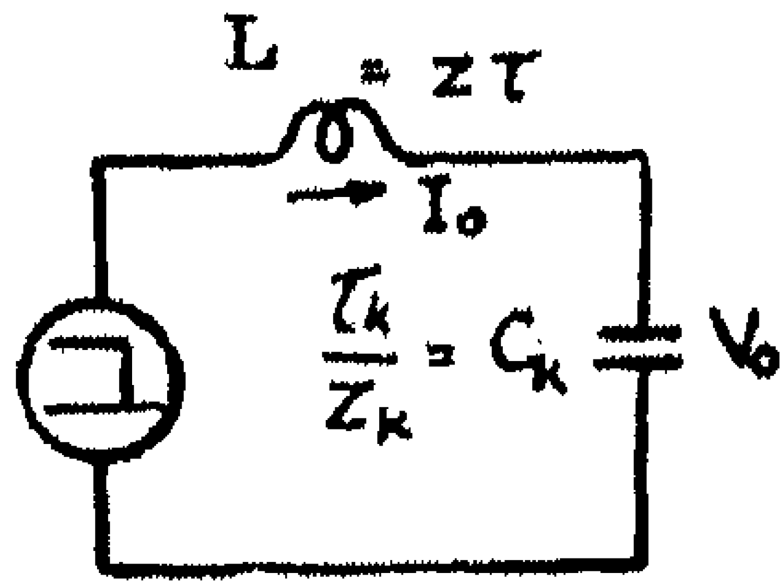
ولخطوط 110 kV : $V_{imp} = 650$ kV ، $V_{op} = 285$ kV. بالنسبة لطول اقتراب أكبر من 1 km ، $\tau_f > 1.2\ \mu$ sec. . وبالتالي، فإن مانعة الصمام الآلي ستعمل عند زمن صغير، فقط إذا:

$$l > \frac{300 \times 1.2 \times 285}{650} = 160 \text{ m}$$

والذي يكون للمحطة الفرعية 110 kV أقل احتمالاً.

وبهذا الأسلوب، في معظم الحالات العملية الهامة، تنكسر ثغرات شرر المانعة بعد شحن سعة الكابل عندما يكون الجهد على الكابل وعند مكان تركيب المانعة متساوي عملياً.





الشكل 13.11: الدائرة المكافئة للحالة الموضحة في الشكل 13.9

وحيث إن تشغيل المانعة والمزيد من الزيادة في الجهد في الدائرة يحدث عند أزمنة كبيرة $\tau \gg \tau_k = l_k / v_k$ والكابل موجود بين معاوقتين [أحدهم يكون عملياً مساوياً مالانهاية] اعتبارياً أكبر من معاوقة تمور الكابل، فإنه يمكن أن يستبدل بسعة مجمعة lumped capacitance C_k حيث $C_k = l_k / v_k z_k = \tau_k / z_k$ وبعدها نأتي إلى الدائرة المكافئة في الشكل 13.11(a) والتي تكون مشابهة لنظام الشكل 13.3(b) في المظهر الخارجي فقط.

من الرسوم البيانية للشكل 13.10، نرى أنه تحت الفروض الخاصة بلحظة تشغيل مانعة الصمام الآلي، فإن طول جبهة الموجة المرتطمة و–بالتالي– الانحدار a_v لا يؤثر عملياً على قيمة الجهد عند بداية ونهاية الكابل. ومن هنا –للتبسيط– من المكن اختبار موجة جهد مستطيلة. إذا افترضنا هنا أنه بعد تشغيل المانعة، فإن الجهد عليها يبقى ثابتاً ويكون مساوياً للفولت المتخلف عند أقصى تيار مسموح، سنحصل على دائرة –للحسابات– كالموضحة في الشكل 13.11(b)، وفيها يكون الكنتور المتذبذب C_k ، L_l موصلان مع مصدر الجهد المباشر $V = V_{res}$ وحيث إن تشغيل المانعة يحدث عند زمن طويل، أي عند لحظة توصيل الجهد للسعة $V_c = V_0$ والتيار في المحاثة، $i = I_0$. وحيث إنه في المانعات الحديثة $V_{op} \cong V_{res}$ وعند زمن تشغيل المانعة، يكون الجهد عليها وعلى الكابل متساويان تقريباً، فإننا يمكن أن

نأخذ $V_{res} \ll V_0$. وبالتالي، ستحدث الظاهرة الانتقالية transient phenomenon في الدائرة فقط على حساب الطاقة المغنطيسية $L_l I_0^2/2$ المخزنة في محاثة الدائرة عند زمن تشغيل المانعة.

في الشكل 13.10، إلى جانب منحنيات الفولت عند ثلاث نقط مميزة، فإن منحنى تغير التيار عند بداية الكابل معطى أيضاً وبمساعدته يمكن إيجاد التيار الابتدائي I_0 إذا كانت الموجة المرتطمة آتية من مسافة والموجة المنعكسة من مكان ضربة الصاعقة لم تصل عند لحظة انهيار ثغرة شرر auto-valve arrestor (AVA). مع ضربات صاعقة قريبة، فإن انعكاسات متعددة من الموجة في الخط بين مكان الضربة والموصلات العمومية للمحطة الفرعية يجب أن تعتبر. في التقريب الأول، فإن هذا التيار يمكن أن يؤخذ مساوياً لـ $I_0 = \left(2V_{imp} - V_{res}\right)/Z$، حيث V_{imp} هو قيمة جهد الموجة المرتطمة impinging wave عند لحظة انهيار ثغرات الشرر لـ AVA.

وحيث إن العملية العابرة في دائرة الشكل 13.11(b) تحدث فقط على حساب طاقة المجال المغنطيسي المخزنة في محاثة الخط، فإن ذروة تذبذب الفولت على السعة يمكن إيجادها من تساوي الطاقة:

$$\frac{L_l I_0^2}{2} = \frac{C_k V_{osc}^2}{2}$$

والفولت المحصل على السعة:

$$V_{ek} = V_{ins} = V_{res} + I_0 \sqrt{C_k} \sin \omega t \qquad (8.13)$$

أقصى جهد على العزل المراد حمايته:

$$V_{ins.m} \cong V_{res} + \frac{2V_{imp} - V_{res}}{Z} \sqrt{\frac{L_1}{C_k}}$$

$$= V_{res} + \left(2V_{imp} - V_{res}\right) \sqrt{\frac{l Z_k}{2 l_k z}} \qquad (9.13)$$

حيث اعتبرنا أن $\nu_k = \nu/2$.

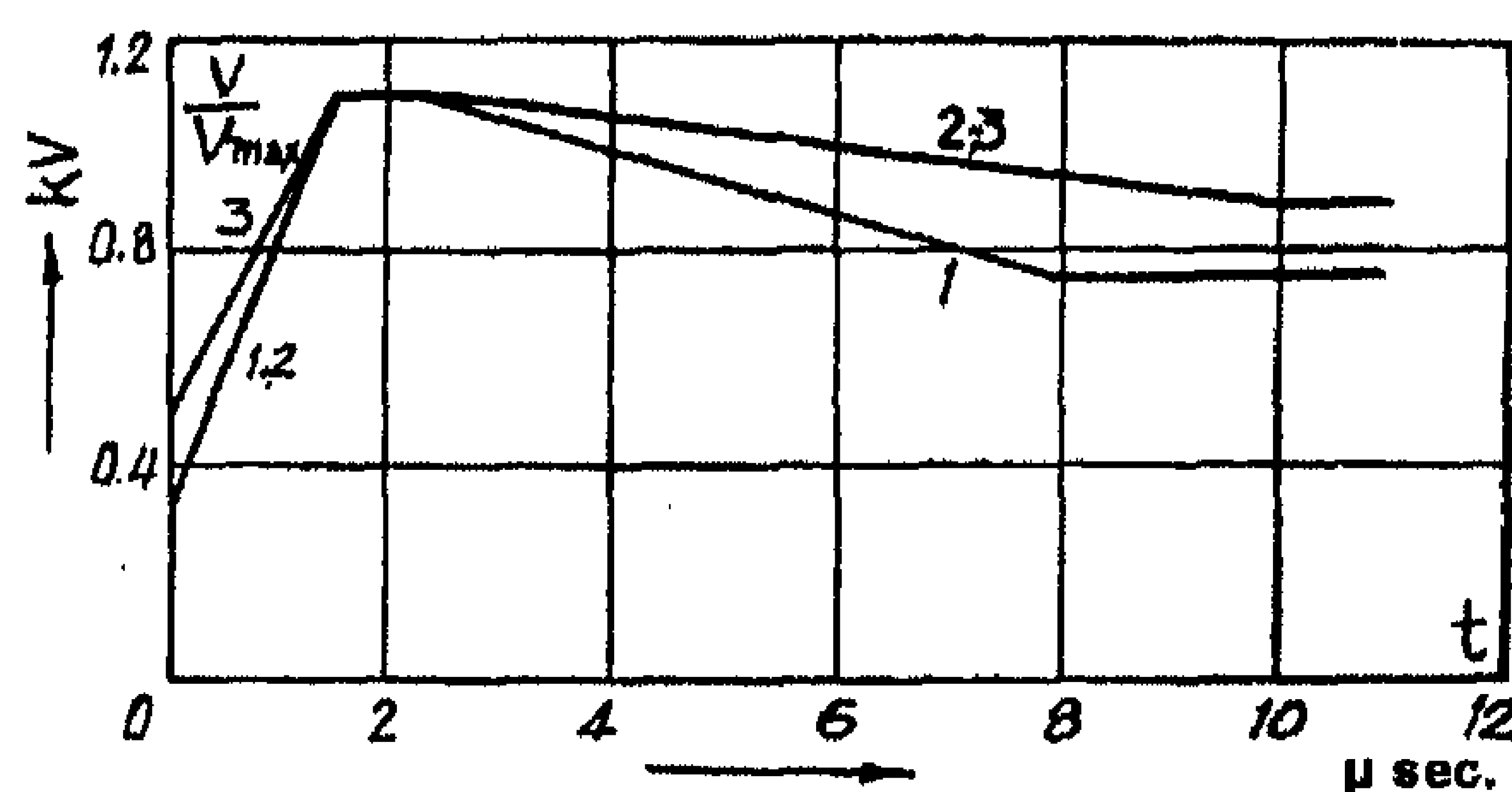
من المعادلة (13.9)، نرى أنه، على النقيض من نظام الشكل 13.3(b)، يعتمد الفولت على العزل في الحالة تحت الاعتبار على ذروة الموجة المرتطمة ومعاوقة تمور الخط، حيث إن التيار في محاثة الخط وذروة تذبذب الفولت يعتمدان كثيراً على هذه الكميات. وبنفس الأسلوب كما سبق، يزداد الجهد على العزل بزيادة طول أسلاك التوصيل الهوائية [العلوية] l. زيادة طول

الكابل –على العكس– تؤدي إلى انخفاض الفولت على العزل، حيث إنه أثناء ذلك فإن السعة C_k تزداد وتنخفض ذروة amplitude الذبذبات. وبالمثل يعتمد الفولت على العزل على الطول الموجي –حيث– في المعادلة (13.9) V_{imp} تعني القيمة اللحظية لفولت الموجة المرتطمة عند لحظة تشغيل المانعة. أثناء فعل الموجات القصيرة جداً على المحطة–الفرعية، فإن المانعة يمكن أن لا تشغل على الأطلاق وسيكون الفولت عبر العزل أقل من V_{res}.

١٣-٥ الجهود المسموحة على العزل Permissible Voltages on the Insulation

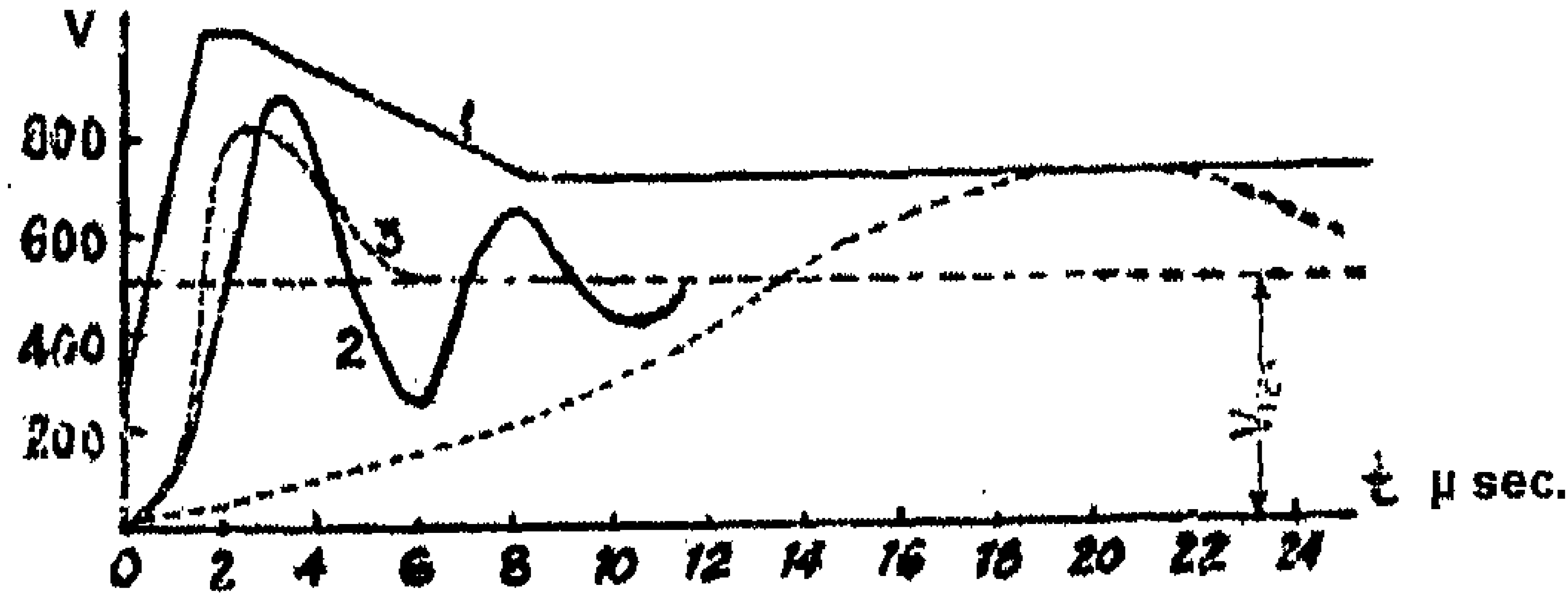
تتكون مهمة حماية المحطة الفرعية من تحديد مواقع مانعات الصمام–الآلي على أرض المحطات الفرعية بأسلوب يجعل الجهد عند كل نقط المحطة الفرعية لا يتعدى الحدود المسموح بها.

وحيث إن المحطات الفرعية تحمى دائماً بدرجة عالية من الاعتمادية reliability، فإن الجهد على العزل سيصل نادراً جداً إلى القيمة المحسوبة [ليس أكبر من (3–2) مرات في مدى عمر المعدة]. لذلك، يكون من الممكن عدم اعتبار التأثير التراكمي لفعل الجهود الزائدة وأن نأخذ جهد الاختبار الدفعي كالجهد المسموح.



الشكل 13.12 : منحنيات جهد الصمود لمحولات ذات جهود اسمية مختلفة.
(1) $V_{max} = 1000$ kV، $V_N = 220$ kV؛ (2) $V_{max} = 550$ kV، $V_N = 110$ kV؛ (3) $V_{max} = 225$ kV، $V_N = 35$ kV

الجهد على العزل يكون موجة طويلة مع ذروة تساوي V_{res} والتي عليها يتراكب إما ذبذبات التردد العالي المخمدة أو دفعات الجهد قصير الدوام. لذلك، فإن جهد الاختبار أثناء تأثير الموجة الكاملة أو المشطورة يمكن أن يخدم كمعيار. ولتوافق تحليل الحماية من الصواعق للمحطات الفرعية، تم إنشاء منحنيات صمود الجهد، الموضحة في الشكل 13.12 والخاصة بعزل المحول على أساس الاختبار بواسطة موجات كاملة ومشطورة بواسطة Moscow Electro Factory.



الشكل 13.13 : مقارنة الجهد على العزل مع جهد الصمود. (1) منحنى جهد الصمود؛ (2) شكل الجهد على العزل حسب الشكل 13.3(a)؛ (3) شكل الجهد على العزل حسب الشكل 13.3(b)؛ (4) شكل الجهد على العزل حسب الشكل 13.9

ولكي يكون عزل المحول بعيداً عن المخاطر، فإن منحنى الجهد على العزل ككل، يجب أن يقع تحت جهد الصمود، كما هو مبين في الشكل 13.13 لجهد اسمي $V_N = 220\ \text{kV}$. ومن هذا المنحنى نرى أنه لنظام الشكل 13.3، في معظم الحالات يكون مُرضياً مقارنة ذروة الجهد على العزل مع جهد الاختبار للموجة المشطورة ولنظام الشكل 13.9 مع جهد اختبار للموجة الكاملة.

بالنسبة للعزل الخارجي من الضروري أن يوجه ليس بجهد الاختبار، بل بالمتانة الدفعية المضمونة للموجة المشطورة أو الكاملة، حيث إن قيمته تحدد ليس بالتأثير التراكمي كما في المحولات، ولكن بواسطة الابتعاد الممكن للظروف الجوية عن تلك المأخوذة أثناء الاختبار – مثلاً– أثناء عمل العزل عند ارتفاع كبير فوق مستوى سطح البحر. وكما رأينا في الفصل ٨، فإن المتانة المضمونة لعزل خارجي تكون أكبر من جهد اختبار المحولات، إذن فإن شروط الحماية للعزل الخارجي تصبح عادة أقل خدمة. إذا كانت الظروف الجوية عند مكان تمركز المحطة–الفرعية [الارتفاع عن سطح البحر] معروفة، فإنه يمكن أن يعتمد التنسيق على المتانة الدفعية الفعلية للعزل.

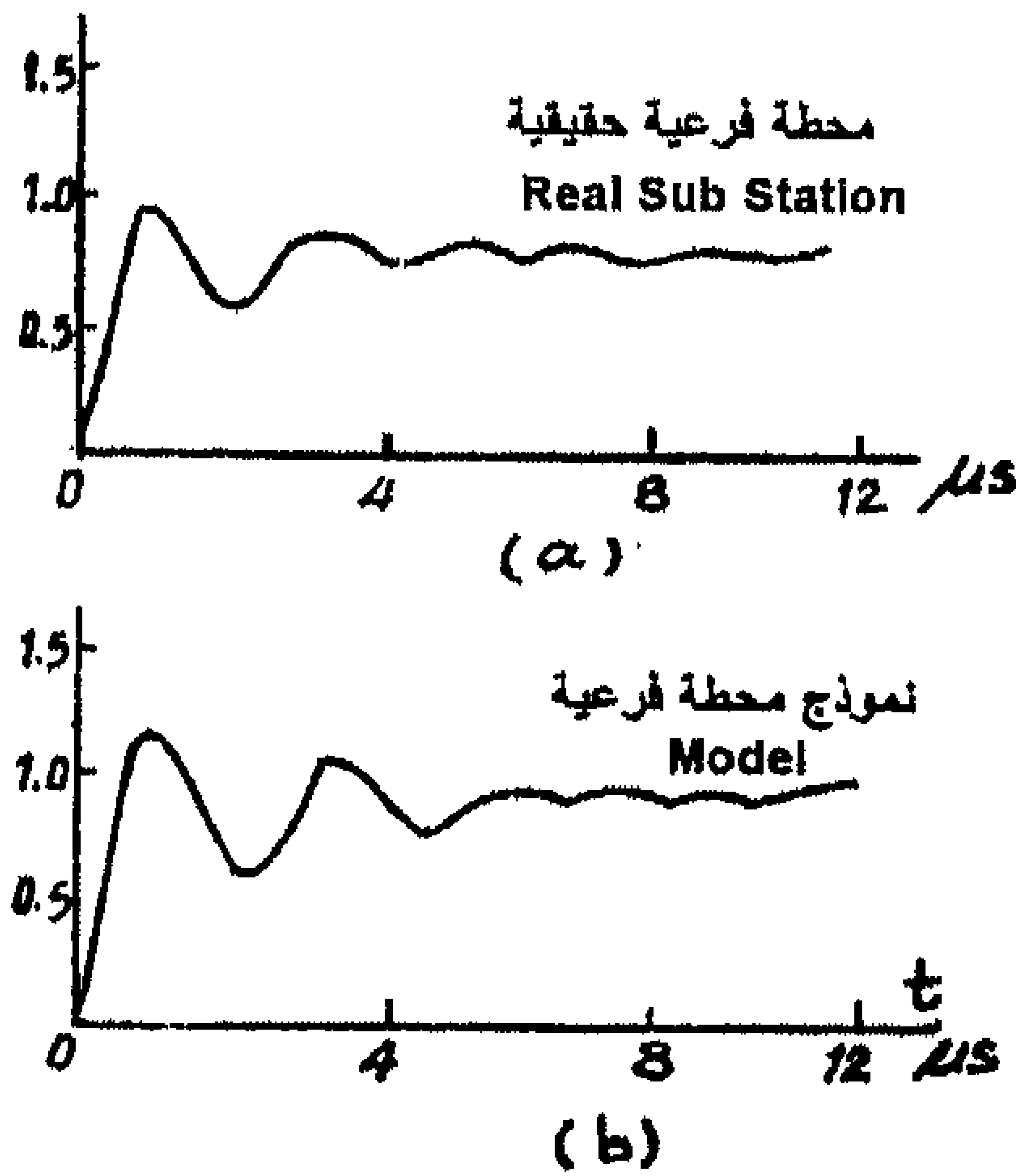
١٣-٦ أبحاث الحماية من الصواعق للمحطات-الفرعية الحقيقية

Investigation of Lightning Protection of Real Sub-Stations

حتى في الأنظمة الأبسط، فإن حسابات الجهد على عزل المحطة–الفرعية يكون غير واسع الانتشار أو يمكن تنفيذه فقط على أساس تقريبات مأخوذة في الاعتبار بمساعدة دوائر مكافئة. أنظمة حسابات المحطات–الفرعية الحقيقية تكون معقدة لدرجة أن التحديد بواسطة حساب الجهد لهم يصبح –عامة– مستحيلاً. ولذلك –حديثاً– استخدم بتوسع وبشكل متزايد طرق

تجريبية. في البدء نفذت أبحاث على المحطات–الفرعية الحقيقية باستخدام مولدات جهد دفعي كمصدر. ومع ذلك، كانت هذه التجارب مرهقة ويمكن أن تعطي نتائج يعول عليها للمحطة–الفرعية التي نُفذت عليها فقط. لذلك، فإن الطريقة الأساسية لوقاية المحطة الفرعية من الصواعق تكون التجارب على النماذج التي تستبدل فيها المعدة بسعات مجمعة، الموصلات العمومية للمحطات الفرعية بواسطة شبكة سُلّمية [نادراً بواسطة قطاعات من الكابلات]، مانعات الصمام–الآلي بواسطة دوائر إلكترونية. مصدر الجهد في النماذج يكون مولد الجهد الدفعي [ذات جهد منخفض] والذي يسمح بتغيير ذروة الموجة وأيضاً طول الموجة وجبهة الموجة داخل حدود واسعة.

النتائج المتحصل عليها على النماذج تم مقارنتها عدة مرات مع القياسات المباشرة على المحطات–الفرعية، أحد هذه المقارنات معطاة في الشكل 13.14. وجميعهم أكدوا الاعتمادية الكاملة للبيانات المتحصل عليها بمساعدة النماذج، والتي على أساسها وضعت كل التوصيات العملية للحماية من الصواعق للمحطات–الفرعية من الموجات الراحلة حديثاً.



الشكل 13.14: تذبذبات الجهد عند أحد نقط (a) محطة فرعية حقيقية؛ (b) نموذج محطة فرعية

قاعدة أبحاث النماذج لها ثلاثة أجزاء رئيسية:

١. مولد يعطي دفعات [نبضات] راجعة ذات جهد منخفض [في حدود (50–200) V]، 50 c/s ، هذه الدفعات تحاكي الجهود الزائدة الجوية الراحلة في اتجاه المحطة–الفرعية، أي أن ذروتهم وشكلهم بمقياس رسم معطى يجب أن يقابل ذروة وشكل الموجات الحقيقية.

٢. مجموعة من العناصر [نماذج من الموصلات–العمومية، المعدات، المانعات] والتي منها يمكن تجميع أي نموذج من المحطات–الفرعية.

٣. أوسيليسكوب Oscilloscope لتسجيل الجهود عند نقط مختلفة من الدائرة، تأثير الدفعة المفتوحة على المضمن modulator والجهد على ألواح مراقب الوقت timer

يحدث متزامناً مع عمل المولد الدفعي، لذلك فعند نفس المكان الواحد من الشاشة يظهر شكل موجة الجهد تحت البحث 50 مرة في الثانية، ويبدو للعين كصورة ساكنة.

وسوف نتناول بعض نماذج العناصر المنفصلة من الدائرة المكافئة لمحطة–فرعية. ويتم عمل نماذج قطاعات الموصلات–العمومية بواسطة شبكات سُلّمية، تتكون من خلايا طراز–π، تقابل كل منها عادة قطاع من 5 m أو 10 m طول. وإذا كان طول الموصلات العمومية كبيراً، يكون مسموح باستبدال القطاعات الأطول بخلية واحدة. ويتم اختيار محاثة وسعة الخلايا على أساس معاوقة تمور الموصلات العمومية Z. وهكذا، بالنسبة لـ $Z = 400\ \Omega$، $v = 300$ m/µ sec.، فإن المحاثة والسعة لكل متر طول: $L' = Z/v = 1.33$ µ henry/m، $C' = 1/Zv = 8.33$ pF/m. معاوقة التمور $Z = 400\ \Omega$ تقابل ضربة موجة على طور واحد. وإذا حدثت الضربة على كل الثلاثة أطوار فإن معاوقة تمور طور واحد تزداد بسبب تأثير الأطوار الأخرى. وعند حدوث ذلك فإن التيارات خلال المانعات تنخفض، مما يؤدي بالتالي إلى تخفيض غير مهم في الجهد المتخلف.

تُصاغ معدة المحطة–الفرعية بواسطة ثوابت مجمعة، يتم اختيار قيمها من الجدول 13.1.

الجدول 13.1 : السعة المكافئة لأجهزة kV (35–220)

الجهاز	خصائص الجهاز	السعة (pF) الحدود الدنيا والعليا	السعة (pF) القيم المتوسطة
محولات القدرة	مع تعويض سعوي ذو سعة كبيرة	1000–3000	1500
	بدون تعويض سعوي ذو سعة صغيرة	300–1000	500
قواطع دائرة	في موقع مغلق	300–800	500
	في موقع مفتوح	200–500	300
عوازل	في موقع مغلق	40–80	60
	في موقع مفتوح	30–60	40
جلب	طراز مكثف	150–300	200
	طراز غير مكثف	100–200	150
محولات جهد		200–500	300

ويجب ملاحظة أن صياغة modelling محول بواسطة سعة والتي تكون مبررة لفترة من الزمن تقدر بعدد قليل من الميكروثانية، تسمح بتحديد الجهد عند جلب المحول فقط ولا تعكس العملية داخل اللفات –وعلى الأخص– زيادة الجهد على التعادل غير المؤرض.

ثغرات شرر مانعات الصمام–الآلي، مانعات أنبوب الطرد والأشياء الأخرى التي لها جهد شرر معطى أو خصائص فولت–ثانية تصاغ بواسطة ثيراترونات thyratrons والتي فيها تنظم لحظة وجهد الإشعال بتغيير جهد الشبكة.

وتعتمد صياغة المقاومة غير الخطية لمانعات الصمام–الآلي على استبدال خصائص الفولت–أمبير للمانعة بخط متكسر يكون من السهل إعادة إنتاجه بمساعدة دوائر إلكترونية بسيطة.

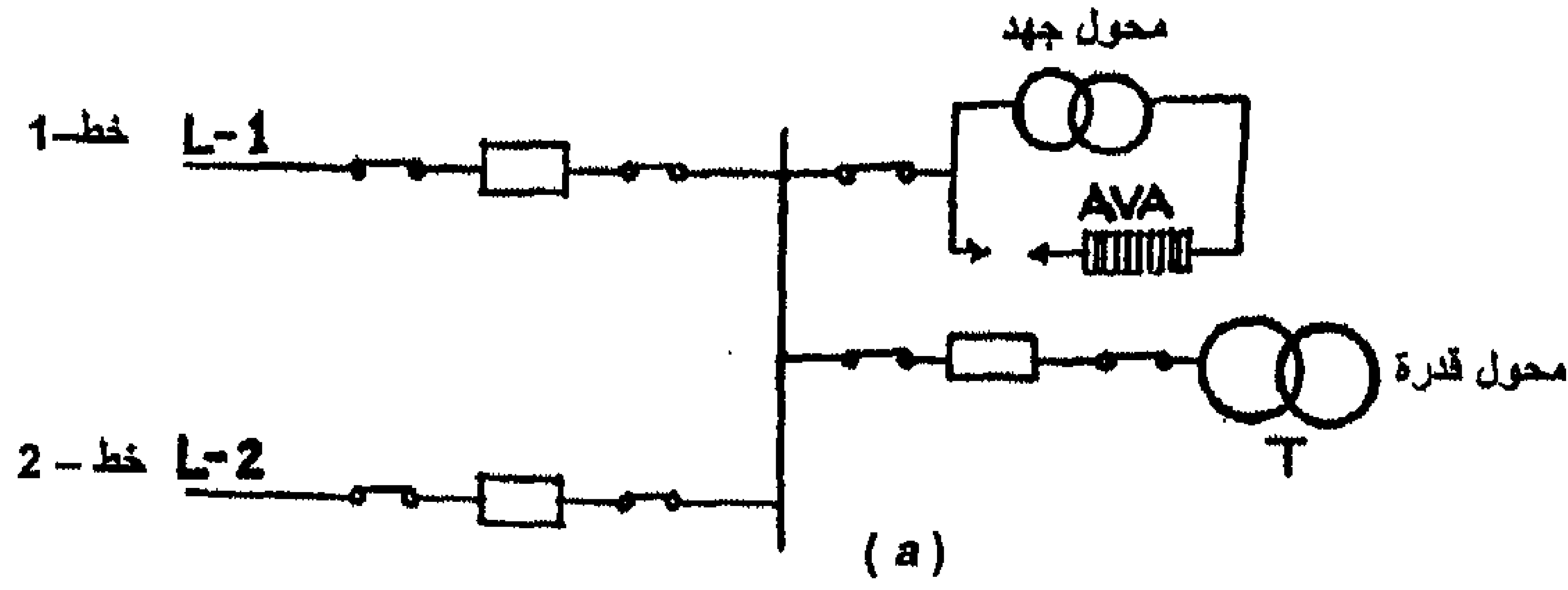
بحث دوائر حماية المحطات–الفرعية على النموذج يتكون من المراحل التالية:

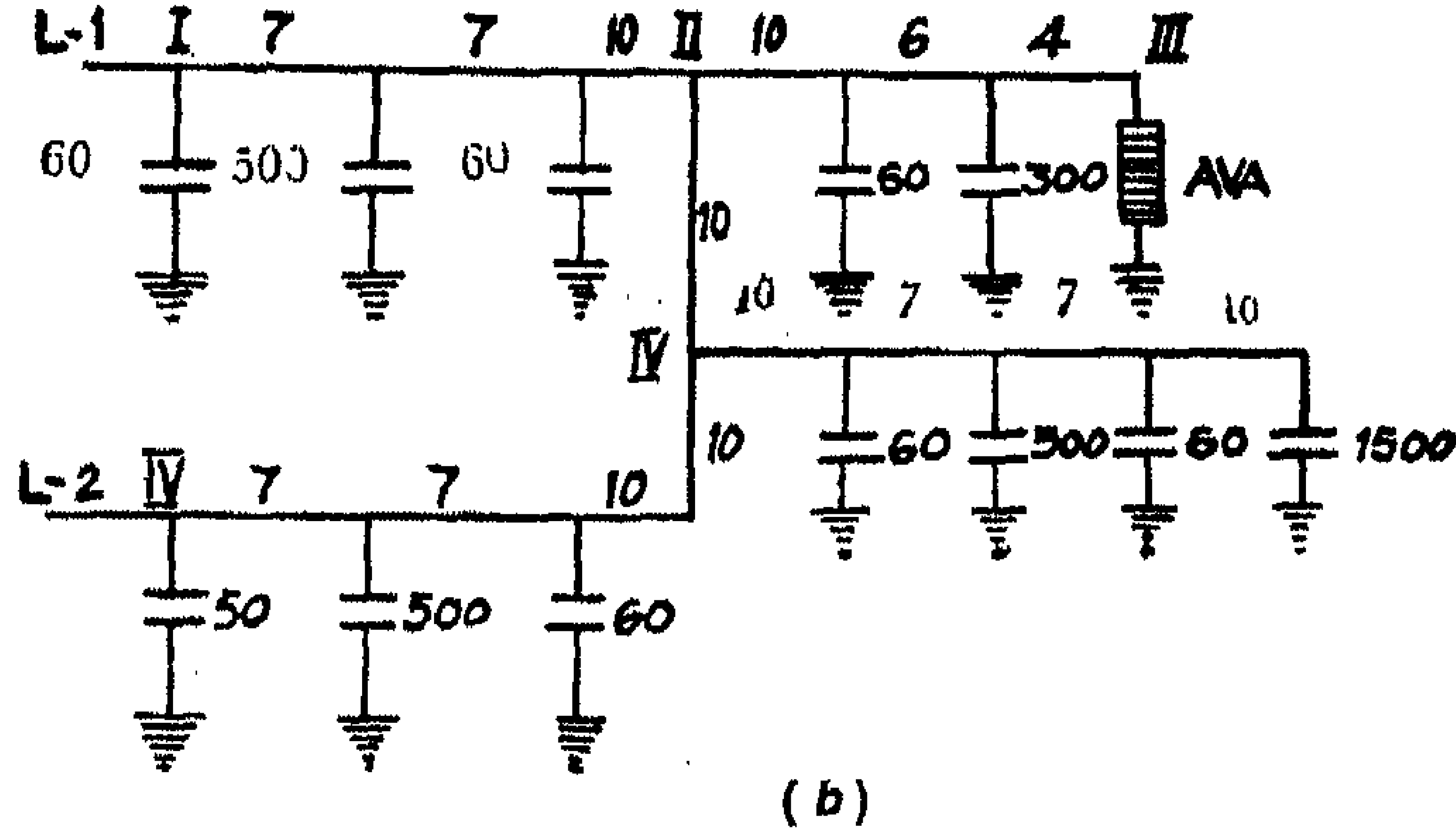
١. باستغلال الدائرة والرسوم الإنشائية، تنشئ دائرة مكافئة للمحطة الفرعية، أي تستبدل عناصر المعدة [محولات، قواطع–دائرة، ...] بواسطة سعات مجمعة، ويحدد من الرسم المسافة بينهم عبر نظام الموصلات العمومية bus-system وتوقع.

٢. الدائرة المكافئة المتحصل عليها بذلك وتحتوي سعات وقطاعات من الموصلات–العمومية يمكن تبحث مباشرة على النموذج ولكن من المرغوب فيه أولاً تبسيط هذه الدائرة بتخفيض عدد السعات وتجميعهم عند عقد الدائرة الأكثر أهمية. ولذلك تنقل السعات إلى العقد الأقرب حسب law of moments، أي أثناء الانتقال فإن كل سعة تنقسم إلى جزئين، تتناسب قيمها عكسياً مع المسافة حتى العقد الأقرب.

٣. الدائرة المتحصل عليها هكذا تكون مجمعة وتم بحثها على النموذج، أي إلى أطراف دخل الدائرة خلال معاوقة تساوي معاوقة تمور الخط، وتعطى دفعات [نبضات] من مولد الجهد الدفعي. ذروة الموجة الراحلة [تساوي نصف الجهد عند خرج المولد الدفعي] تؤخذ مساوية لجهد شرر العزل للخط ويكون الانحدار متغيراً. تسجل الجهود عند المحطة–الفرعية الأبعد عن المانعات.

٤. تقارن القيم المتحصل عليها مع المتانة المضمونة أو مع جهد اختبار العزل طبقاً للاعتبارات المعطاة في البند ١٣–٥، يحدد الانحدار الحرج [الخطير] الذي عنده تكون الجهود عند النقط المختلفة تبدو أعلى من القيم المسموحة. وبالأخذ في الاعتبار احتمال ظهور هذا الانحدار، من المكن رسم استنتاج عن الطول الأساسي للاقتراب وعول الحماية من الصواعق للمحطة الفرعية.





I، II ... العقد الأساسية

الشكل 13.15: (a) مخطط خط مفرد لمحطة فرعية 110 kV؛ (b) الدائرة المكافئة لـ(a)

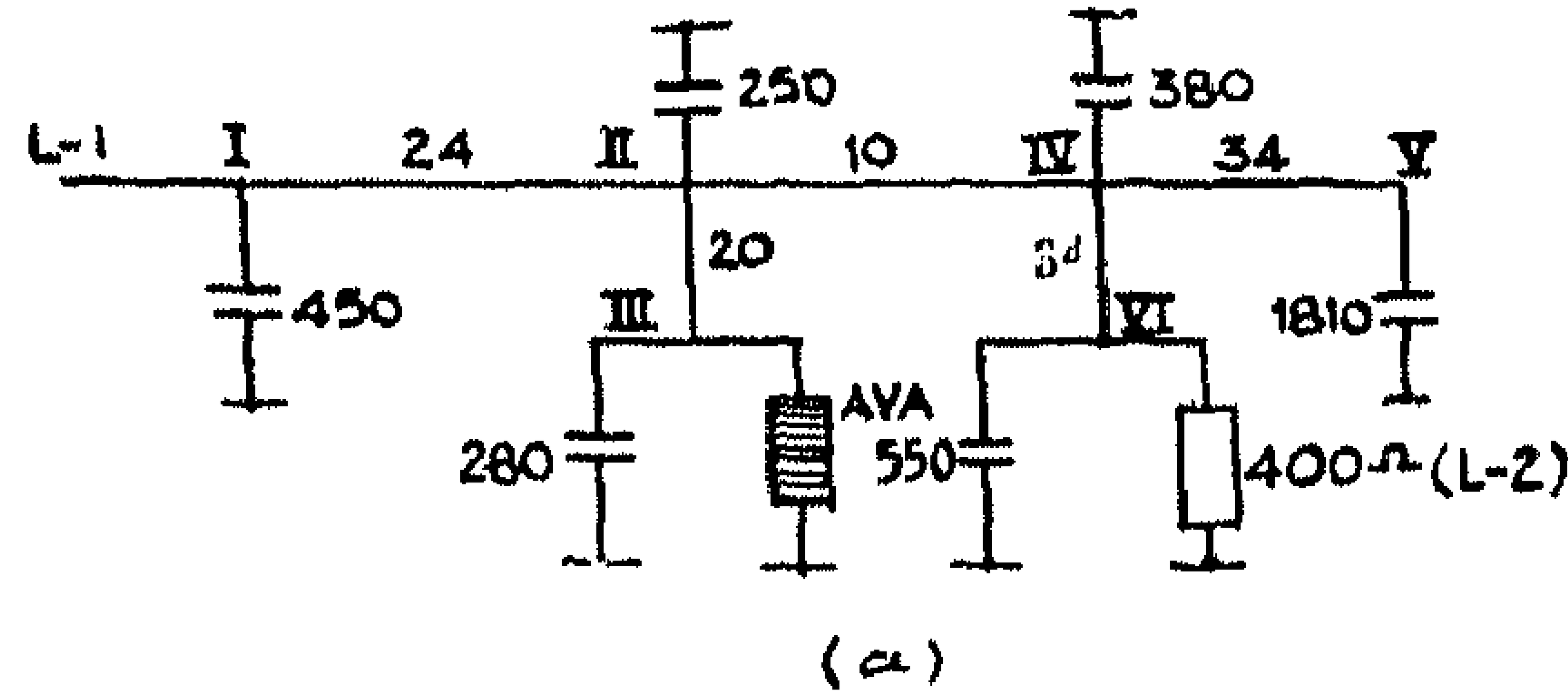
وكمثال سنفحص النظام البسيط لمحطة فرعية صغيرة 110 kV والمعطى في الشكل 13.15(a). في الشكل 13.15(b) يبين الدائرة المكافئة للمحطة الفرعية مع عدد كامل من الخطوط الموصلة إليها مع المسافة بين الأجهزة عبر نظام الموصلات العمومية وعدد العقد الأساسية معطى.

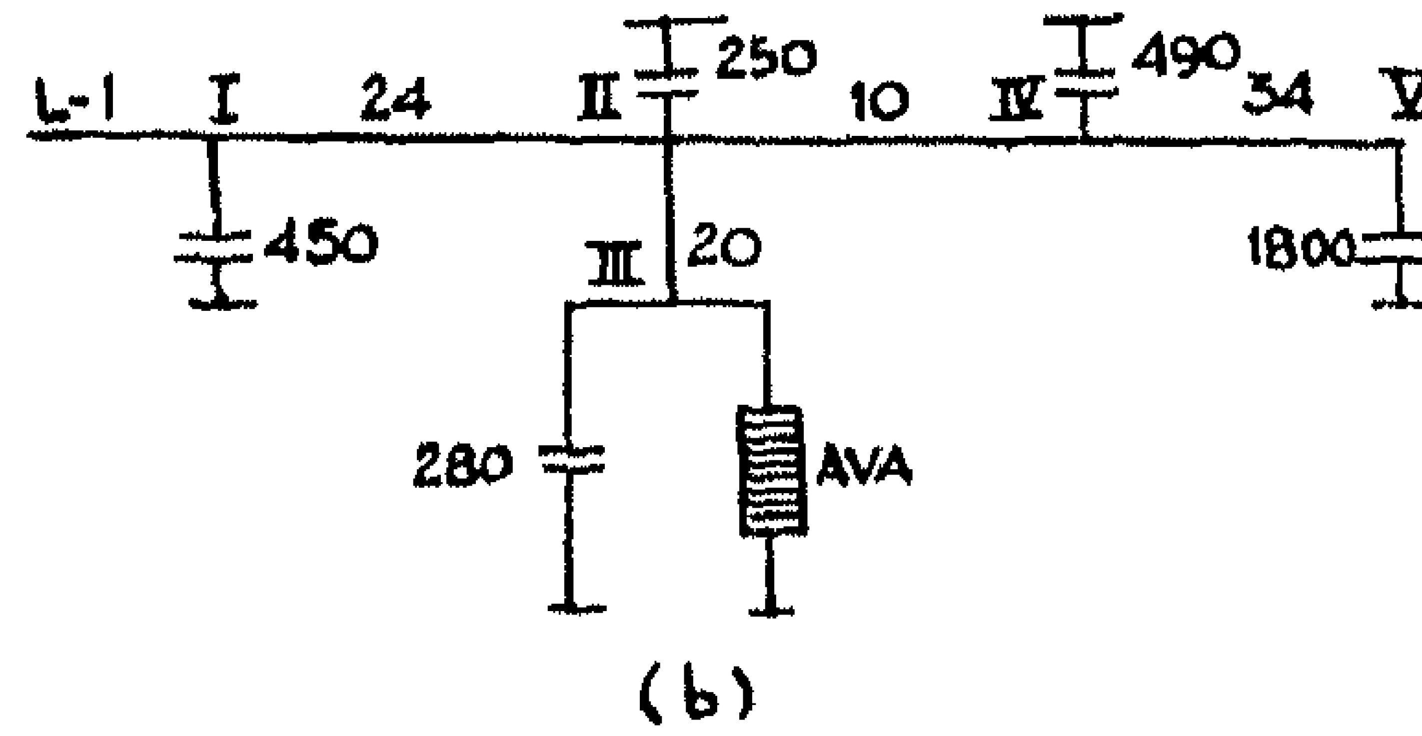
إذا ضربت الموجة أحد الخطين L-1 ، L-2 يستبدل الخط الثاني بمعاوقته التمورية. وحيث إن المانعة مركبة بشكل غير متماثل بالنسبة لكلا الخطين، يكون من الممكن وجود أربعة متغيرات للدوائر للحساب:

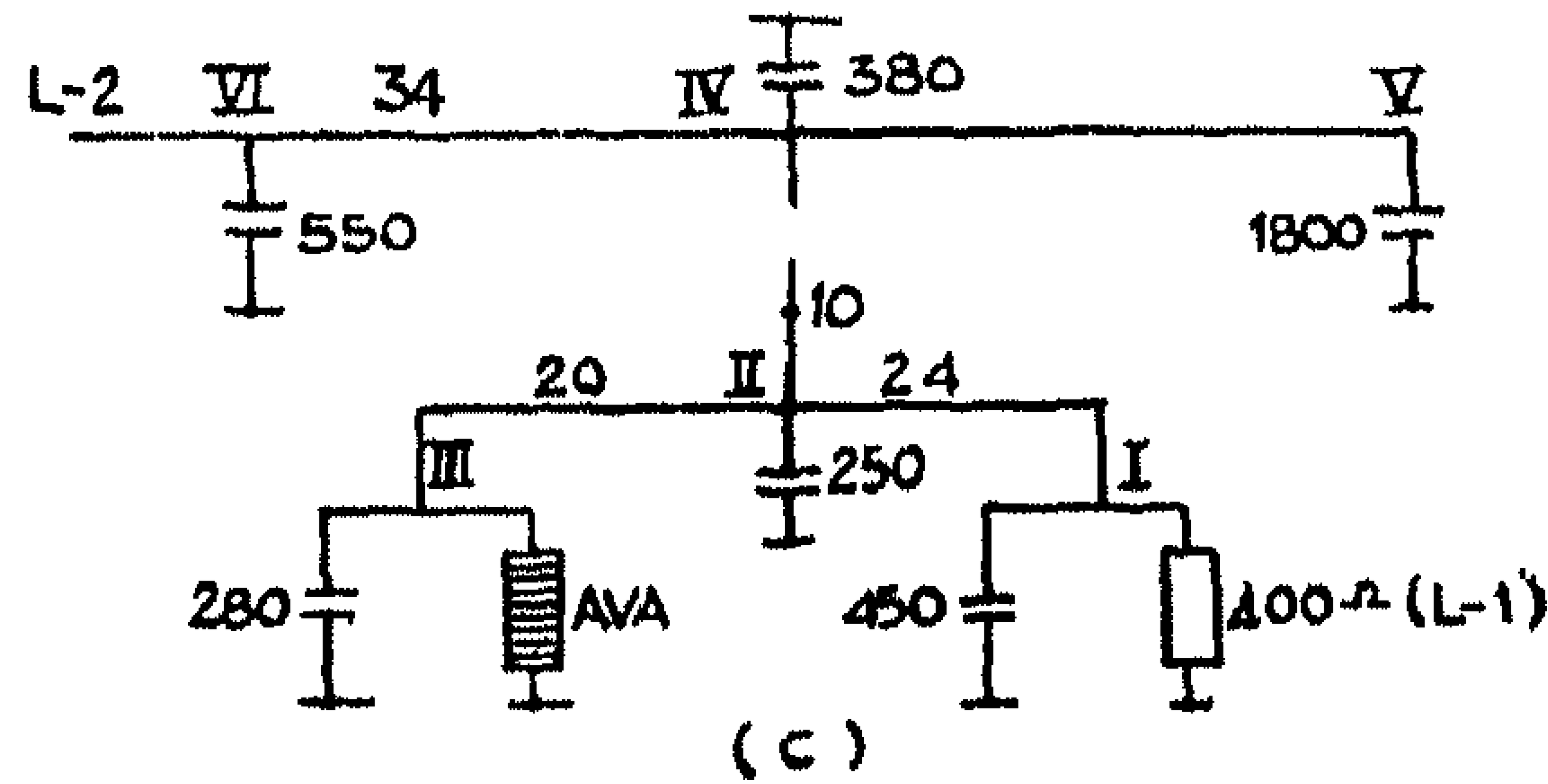
١. الموجة تضرب الخط L-1 ، الخط L-2 مشغلاً [مغلق الدائرة].
٢. الموجة تضرب الخط L-1 ، الخط L-2 مفتوح الدائرة [مفصول].
٣. الموجة تضرب الخط L-2 ، الخط L-1 مشغلاً.
٤. الموجة تضرب الخط L-2 ، الخط L-1 مفتوح الدائرة.

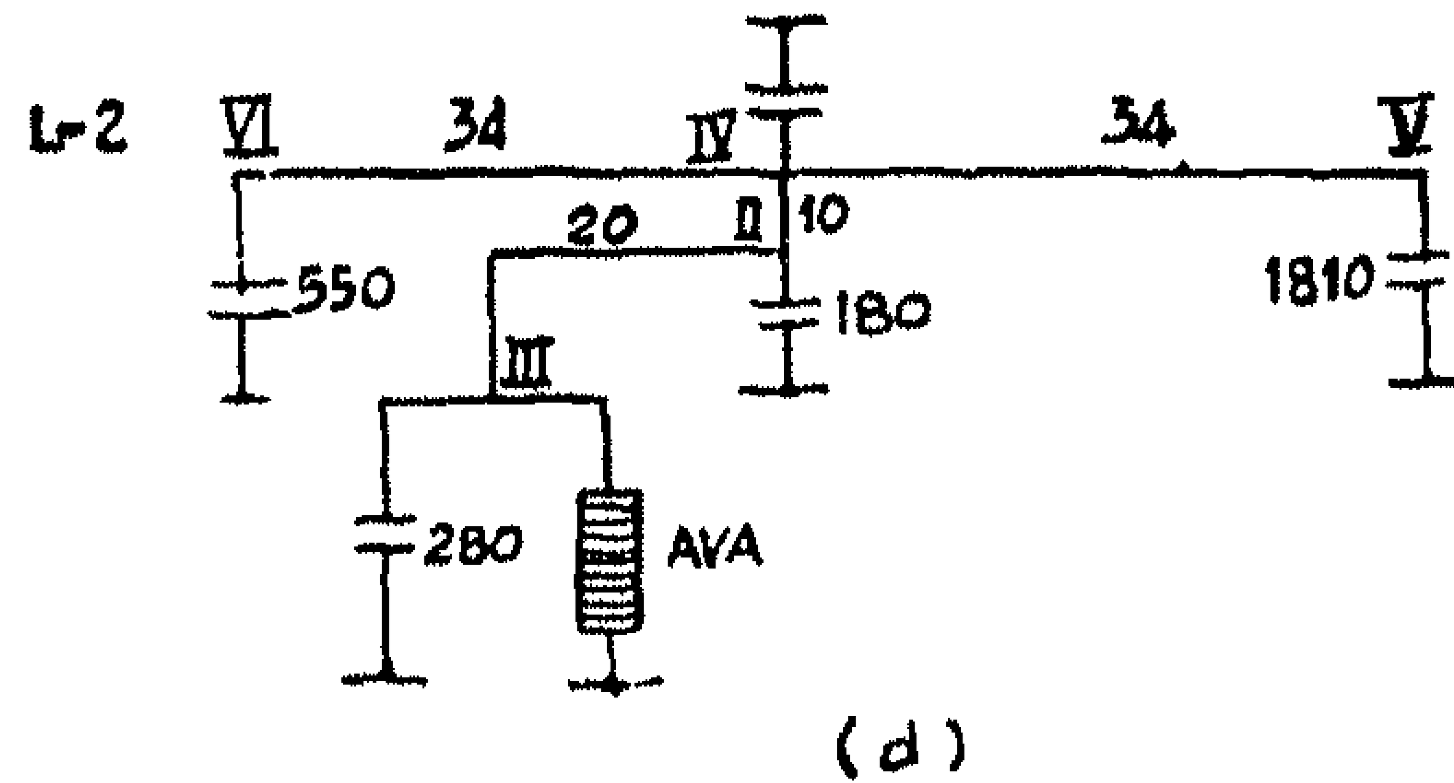
بعد نقل السعات للعقد، نحصل على أربع دوائر مكافئة للأبحاث على النموذج موضحة في الشكل 13.16. ويمكن إجراء مزيد من التبسيط لدوائر الشكل 13.16(b) ، 13.16(d) بنقل سعات

العقد IV أو II إلى العقد المجاورة. ثم نحصل على دوائر الشكل 13.17 التي تتكون من ثلاث نقط مميزة، وهذه هي عوازل الخط، والعقد حيث توصل المانعة والمحول، مثل هذه الدائرة تكون نموذجية لمعظم المحطات الفرعية أثناء عملها في نظام الطرف الهامد [غير المكهرب] .dead end regime

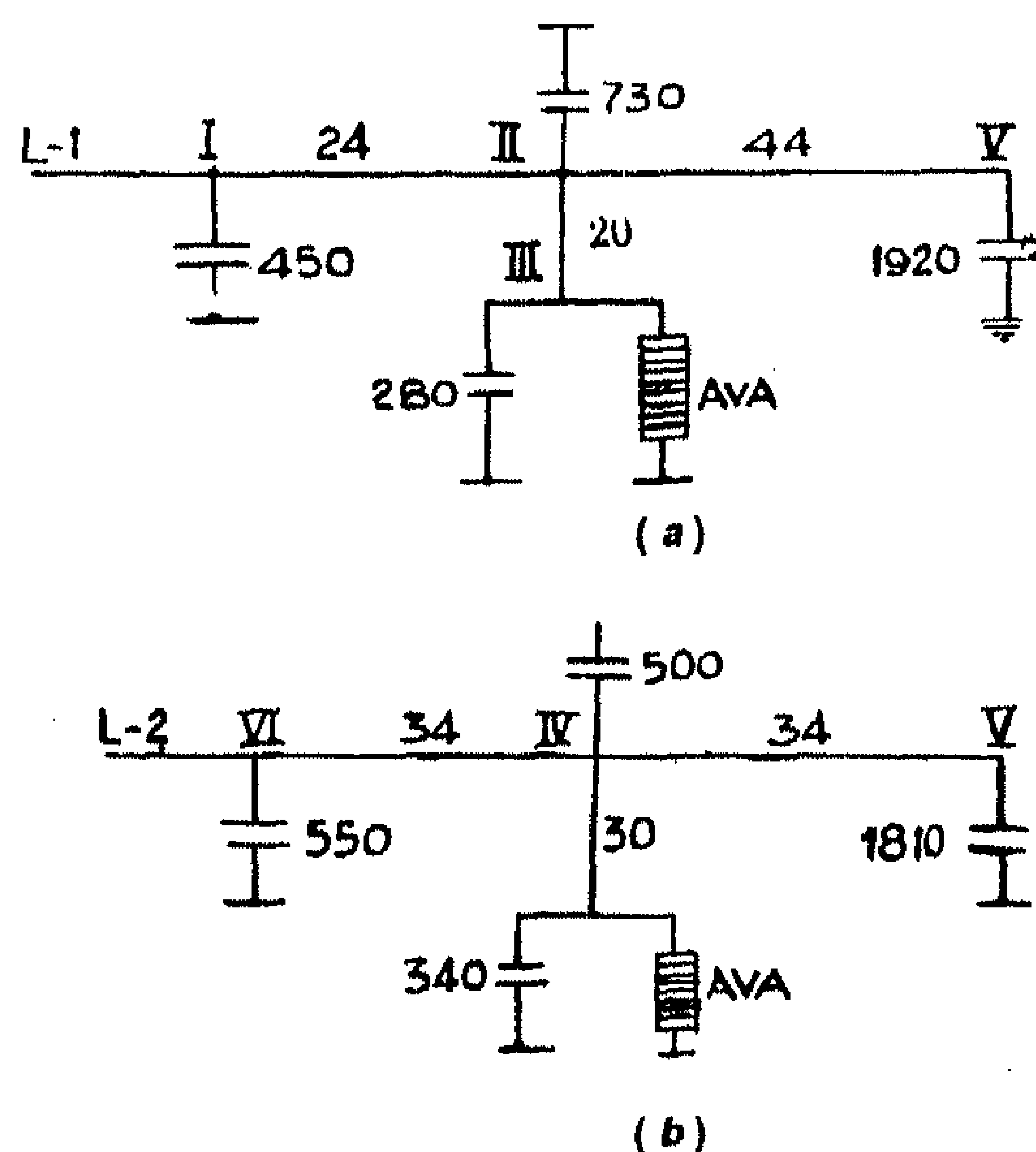




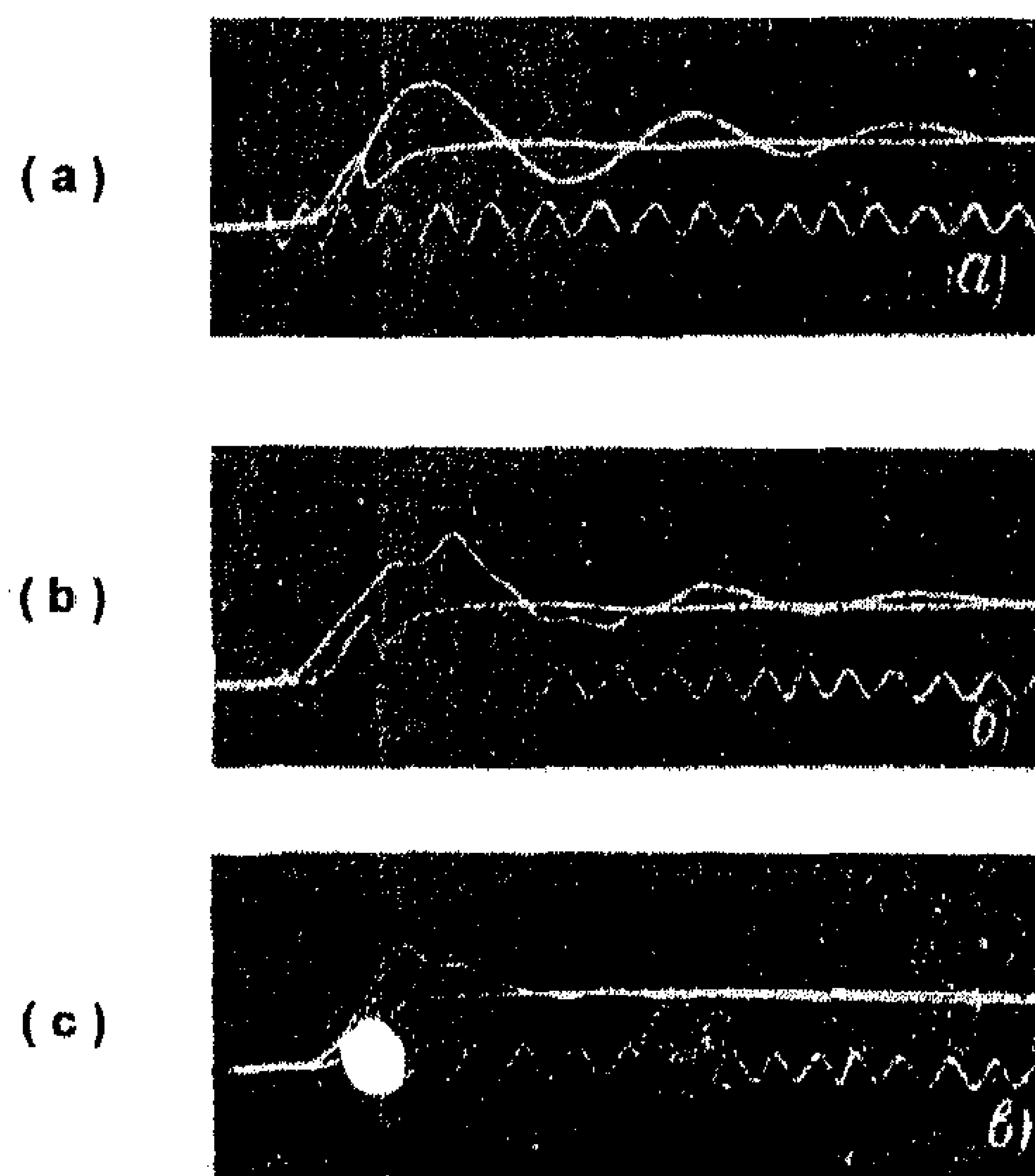




الشكل 13.16: دوائر مكافئة مبسطة للمحطة الفرعية في الشكل 13.15(a) للأبحاث على النموذج



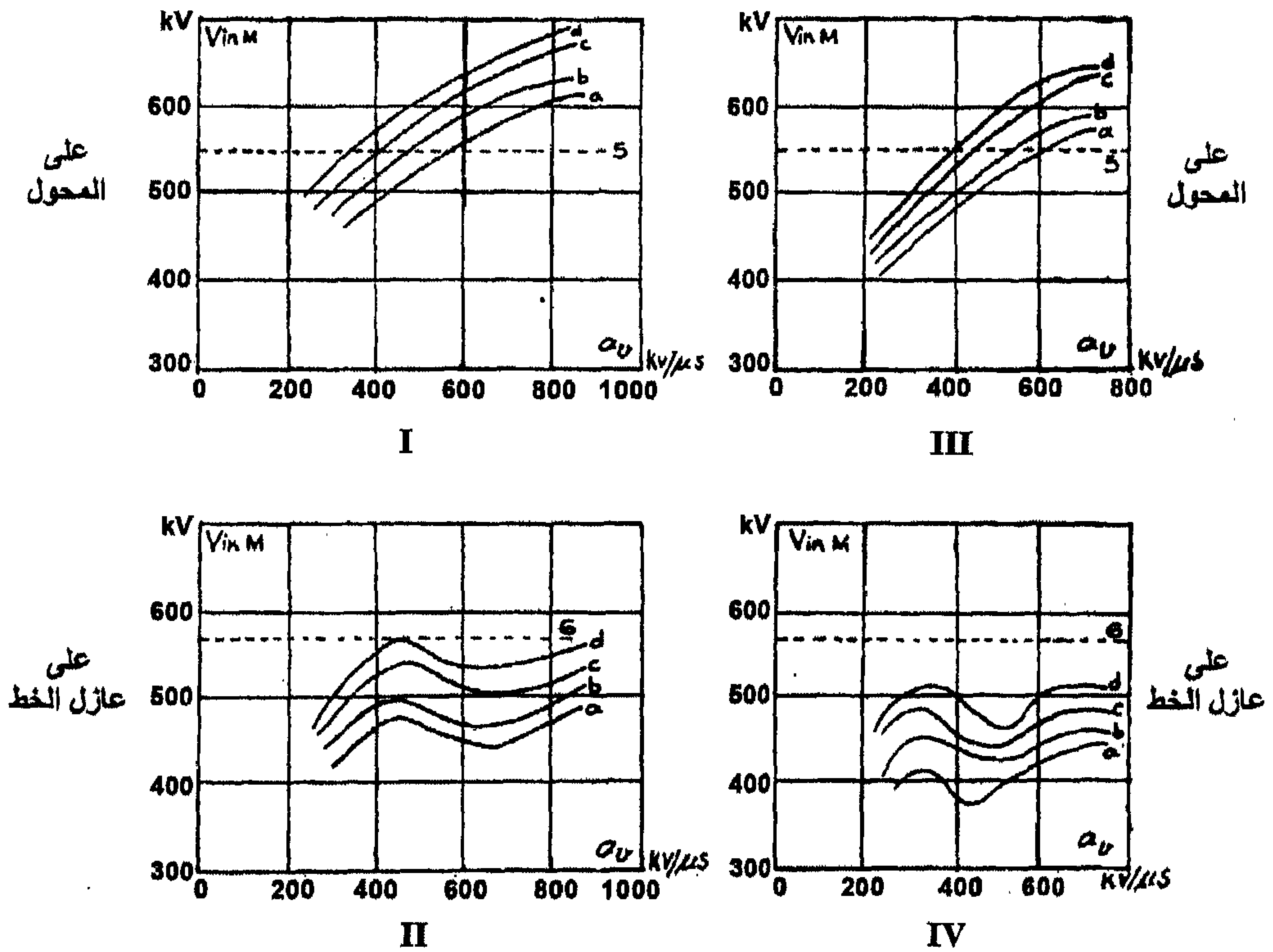
الشكل 13.17 : مخططات مبسطة لتشغيل المحطة الفرعية في الشكل 13.15(a) في نظام الطرف الهامد



الشكل 13.18 : أوسليجرامات الجهد عند النقط النموذجية للمحطة الفرعية في الشكل 13.15. (a) الجهد على المانعة والمحول؛ (b) الجهد على المانعة وعازل الخط عندما يكون المحول موصل؛ (c) الجهد على المانعة وعازل الخط عندما يكون المحول مفصولاً

في الشكل 13.18 ، مثال لأوسليجرامات جهود عند النقط المميزة للمحطة الفرعية لنظام الطرف الهامد لعملها أي على المانعة ، المحول وعازل الخط المضروب بالموجة. الجهد على

المحول في نظام الطرف الهامد شكل متذبذب [الشكل 13.18(a)] وكذلك في النظام البسيط للشكل 13.3(b) السابق فحصه. منحنيات الجهد على عازل الخط [الشكل 13.18(b)] تختلف قليلاً عن المنحنيات المتحصل عليها في الدوائر الأبسط في تفصيلات قليلة، وهذه الفروق تحدث بسبب سعة المحول. الموجة المنعكسة من السعة تعطي حافة ناتئة على جبهة منحنى الجهد، التذبذبات على الموجة تكون مشروحة بالمثل بواسطة تأثير السعة. وإذا فصلت سعة المحول، نحصل على المنحنى المقابل للدائرة الأبسط [الشكل 13.18(c)].



الشكل 13.19: منحنيات اعتماد الجهد على المحول [I، III]، وعازل الخط [II، IV] على الانحدار في حالة ذروة الموجة المرتطمة تساوي 900 kV [I، II]، 750 kV [III، IV]. الحروف التي على المنحنيات ترجع إلى المخططات المختلفة في الشكل 13.16

في الشكل 13.19 موضح منحنيات اعتماد الجهد على المحول وعازل خط محطة-فرعية 110 kV على انحدار ذروات amplitudes موجة مرتطمة 900 kV، 750 kV والتي تقابل تقريباً جهد شرر عزل الخطوط على دعامات خشبية ومعدنية.

تزداد الجهود على المحول بزيادة الانحدار. منحنيات الجهد على عازل الخط لها حد أقصى محلي يرجع إلى حقيقة أن الموجة المنعكسة من سعة المحول تؤخر تشغيل المانعة.

أثناء انخفاض ذروة الموجة المرتطمة من 900 kV إلى 750 kV، فإن الجهود على المحول تتغير بشكل ضئيل. الجهود على عازل الخط تنخفض وتنقل القيم القصوى إلى منطقة الانحدار الأصغر.

بمقارنة منحنيات الشكل 13.19 مع الخصائص الكهربية للعزل، يمكن تحديد الانحدار المسموح الذي لا يؤدي إلى ارتفاعات جهد خطيرة. وسوف نفترض أن المحطة–الفرعية تعمل عند zero marking وانحراف كثافة الهواء النسبية عن القيمة القياسية لا يزيد عن 5%، أي أن متانة العزل الخارجي مع موجة مشطورة يكون $0.95V_{test} = 0.95\times600 = 570$ kV. الخطوط المستقيمة، التي تميز المتانة الدفعية للعزل الداخلي والخارجي [550 kV، 570 kV] معطيان في الشكل 13.19، وتعطي نقط تقاطعها مع المنحنيات الانحدارات الحرجة. الانحدارات ذات القيم الأقل من الانحدار الحرج يجب أن لا تؤدي إلى ارتفاعات خطيرة للجهد وتدمير أو شرر للعزل.

من الشكل 13.19 نرى أنه في كلا الحالتين يكون الانحدار المسموح 360 kV/μ sec. في نظام الطرف الهامد، 450 kV/μ sec. مع الخطين موصلين، وهذا الانحدار يحدد بشروط تشغيل العزل الداخلي.

على أساس هذه الانحدارات، سنحدد اعتمادية reliability حماية المحطة–الفرعية. وسنعتبر أن الخط على دعائم معدنية له أسلاك أرضية عبر طوله الكلي. بالنسبة للخطوط التي على دعائم معدنية [$V_{50\%}$ □ 750 kV]، أطوال جبهة الموجة $\tau_f = 2.1$ μ sec.، $\tau_f = 1.7$ μ sec. تناظر الانحدار المذكور بأعلى. وبأخذ نصف قطر الموصل $r = 0.5$ cm والارتفاع المتوسط للتعليق $h = 12$ m، وطبقاً للحسابات سنجد أنه عند $V = 750$ kV –وتحت تأثير الكورونا– يزداد طول جبهة الموجة حتى 1.1 μ sec. عبر طول 1 km من المسافة. ومن هنا فمع خط واحد موصل، تكون الموجات الناشئة على الموصل عند مسافة أقل من 19 km من المحطة الفرعية فقط هي الخطيرة، ومع خطين موصلين، تكون الموجات التي على مسافة أقل من 1.55 km من المحطة هي الخطيرة.

والآن دعنا نفترض أن خط 110 kV له سلكان أرضيان معلقان بحيث نحصل على زاوية وقاية 30°، ارتفاع البرج $h_t = 20$ m ومقاومة تأريضهم $R = 10\ \Omega$. فإن طبقاً

للمعادلة (12.51) يمكن تقدير المستوى الواقي كالآتي:

$$I_p = \frac{750}{10+0.15\times 20} \cong 60 \text{ kA}$$

واحتمال شرر العزل على البرج، $\nu_{flash} = 0.10$. واحتمال القطع خلال الصواعق خلال حماية السلك الأرضي حسب المعادلة (12.48) ν_α تكون:

$$\log \nu_\alpha = \frac{\alpha\sqrt{h_t}}{90} - 4 = \frac{30\sqrt{20}}{90} - 4 = -2.5$$

أو

$$\nu_\alpha = 0.0032$$

وبإهمال الاحتمال الصغيرة لشرر العزل أثناء ضربه عند وسط الباع، على أساس المعادلة (13.2) سنحصل على: بالنسبة لمحطة-فرعية ذات خط مقترب واحد، يكون عدد حالات التدمير المحتملة للعزل هو:

$$N_1 = 1.8\times 12\frac{1.9}{100}(0.0032+0.050) = 0.022$$

وبالتالي يكون دليل [قرينة] index مقاومة الصواعق [عدد سنوات العمل بدون تدمير] يساوي $1/N_1 = 45$ years .

وبالنسبة لمحطة-فرعية ذات خطين خارجين فإن القيمة المقابلة تكون:

$$N_2 = 0.022\frac{1.55}{1.9}\times 2 = 0.036$$

حيث العامل 2 يعتبر ظروف إمكانية أن تأتي الموجة عبر كلا الخطين.

وبهذا الأسلوب، بالرغم من حقيقة أنه في نظام الطرف الهامد، يحدث أن يكون الانحدار المسموح أقل، يكون دليل مقاومة الصواعق على المحطة-الفرعية في هذه الحالة أعلى، حيث إنه مع خطين فإن العدد الكلي من الموجات الراحلة في اتجاه المحطة-الفرعية يزداد بمرتين.

بالنسبة للمحطات-الفرعية الأكثر قدرة والتي لها عدد كبير من الخطوط الخارجة، يمكن أن تكون الشروط مختلفة. فعلياً، في وجود عدد n من الخطوط دائمة التوصيل كل منها له معاوقة تمور Z ، فإن معاوقة التمور الإجمالية للخطوط الخارجة عندما تضرب الموجة أحدهم تكون مساوية:

$$Z_e = \frac{Z}{n-1}$$

ولعدد معطى n ، تصبح هذه المعاوقة مساوية لمعاوقة مانعة الصمام الآلي AVA عند أقصى تيار مسموح.

إذا أخذنا معاوقة تمور خط مساوية لـ Ω 400 ولا تعتمد على جهدة الاسمى، فإن عدد الخطوط المكافئة في المعاوقة لـ AVA، يمكن أن تقدر بمساعدة الجدول 13.2.

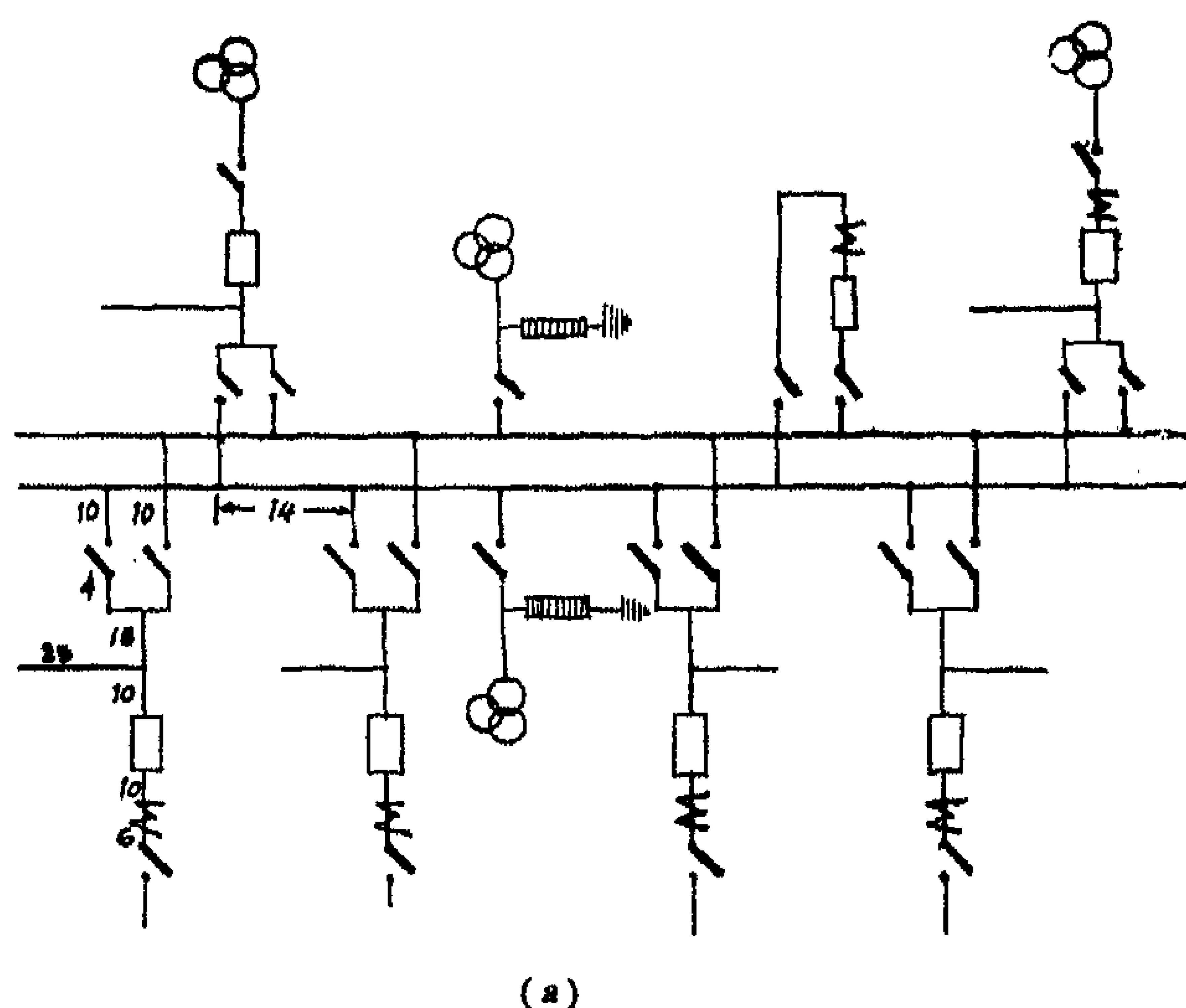
الجدول 13.2

الجهد الاسمى (kV)	معاوقة AVA بالأوم عند تيار دفعي قيمته		العدد المكافئ من الخطوط عند تيار قيمته	
	5 kA	10 kA	5 kA	10 kA
35	26	14.3	16	29
110	67	36.7	7	12
154	93	61.0	5	9
220	134	73.4	4	6
500	212	117	3	4

من الجدول 13.2 نرى أن الزيادة في الخطوط الخارجة إلى (6–5) في حالة المحطات الفرعية 35 kV لا يؤثر تأثيراً محسوساً على تغير الجهد على العزل، حيث إن معاوقتهم المكافئة تكون أكبر من معاوقة المانعة. وإلى جانب ذلك، فإن العدد الإجمالي من الموجات المؤثرة على المحطة–الفرعية سيزداد. إذن المحطات–الفرعية 35 kV نظام الطرف الهامد، كقاعدة يكون لها أدنى دليل مقاومة صواعق.

المحطات–الفرعية 220 kV لديها للمعاوقة المكافئة للمانعة (5–3) خط خارج [العدد الإجمالي للخطوط (6–3)]. ولهذا العدد من الخطوط، ويمكن أن يبدو أنه من الممكن إلغاؤها مع مانعة الصمام جميعاً. ومع ذلك، فإن هذا القرار يمكن أن يُتخذ فقط بعد أبحاث متأنية على النموذج، حيث بسبب العدد الكبير من الموجات المؤثرة على المحطة–الفرعية، فإن دليل مقاومة الصواعق للمحطة–الفرعية في غياب المانعة يمكن أن نجده مُرضياً.

وكمثال، سنفحص حماية معدة توزيع 220 kV لها نظام موصلات عمومية مزدوج، محولان، وأربعة خطوط. مخطط الخط المفرد لهذه المحطة–الفرعية مع الأبعاد الأساسية معطى في الشكل 13.20(a) [مقطع بطول الخط وخلية المحول، بينما الأبعاد الرئيسية، معطاة في الشكل 13.20(b)].

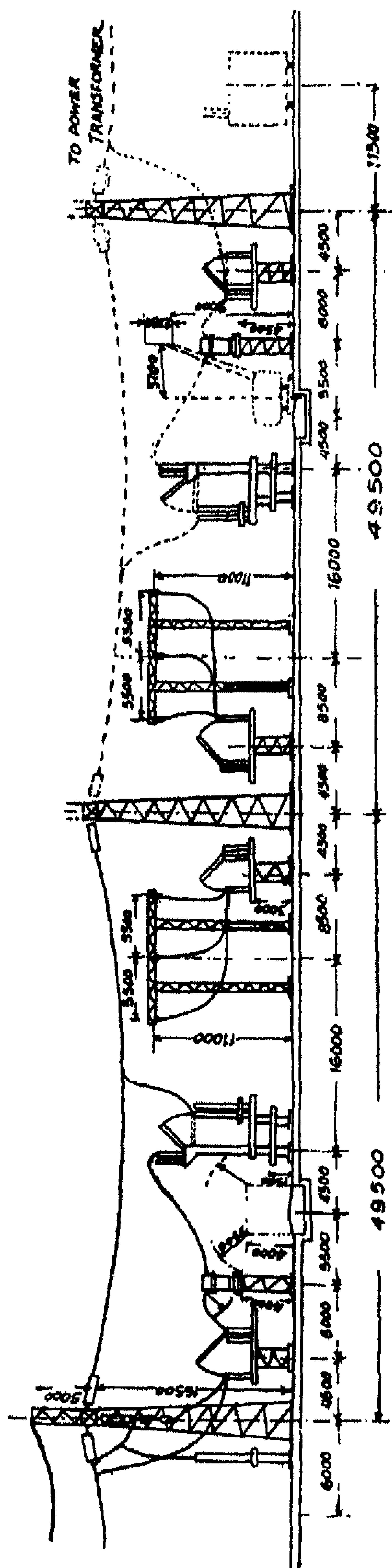


(a)

الشكل 13.20(a): محطة فرعية 220 kV. (a) مخطط خط مفرد

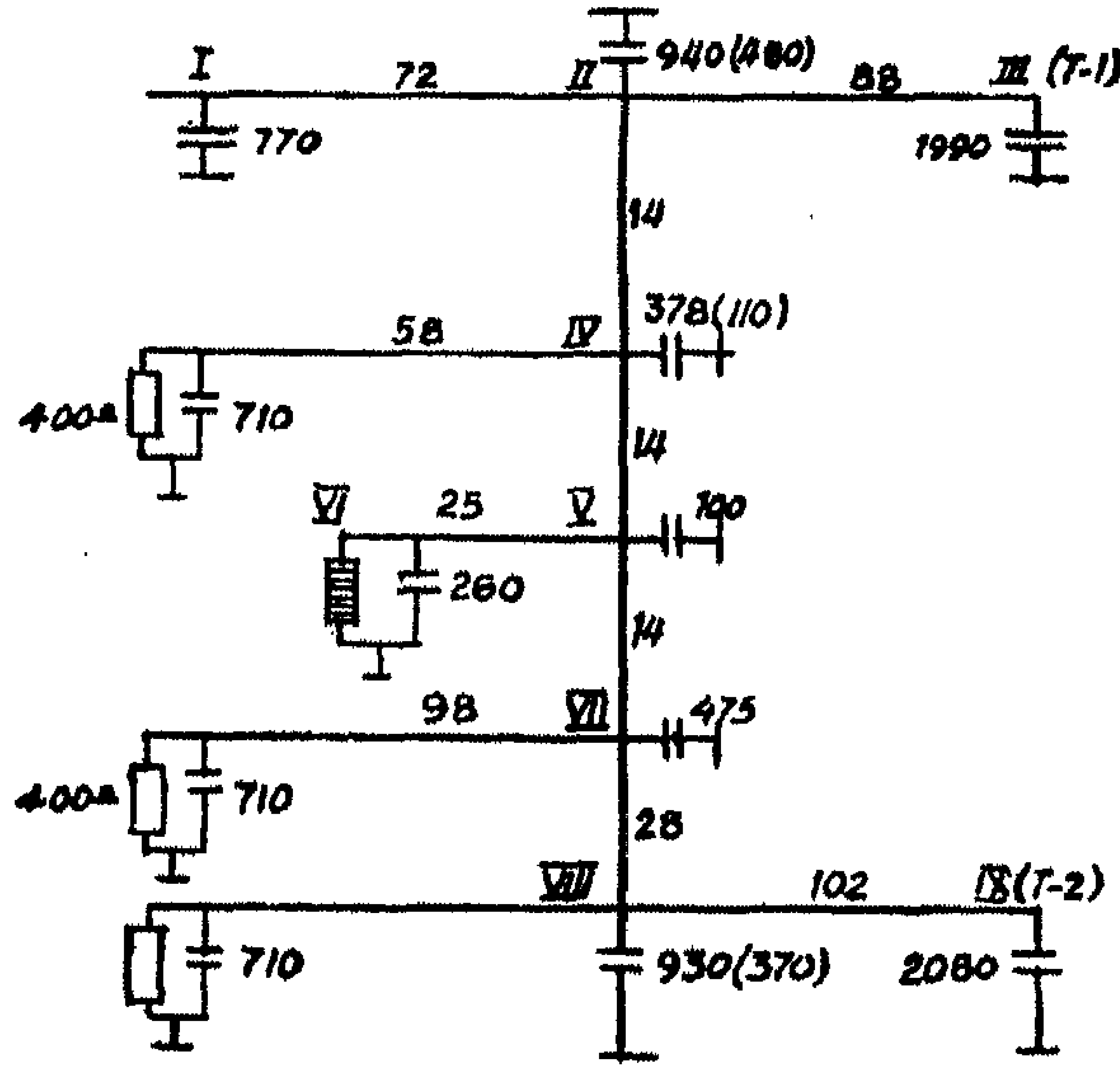
ولكي نتجنب التعقيد في الدائرة المراد فحصها، سندرس الحالة عندما تكون كل الخطوط والمحولات تعمل على نظام واحد من الموصلات العمومية. دائرة المحول للبحث على نموذج بعد إحلال قطاعات قصيرة من الموصل العمومي والمعدة بسعات وتحويل السعات إلى عقد معطى في الشكل 13.21. في التجارب كان الخط-1 والمحول-2 موصلان توصيلاً دائماً، كل الخطوط الأخرى والمحول-1 كانت مفصولة [قيم السعات عند العقد مع الخط المفصول والمحول-1 موضحة بين الأقواس].

مع كل الخطوط موصلة، فإن منحنيات الفولت على المحول -بنفس الأسلوب كما في الدوائر الأبسط- يكون لها خاصية تذبذبية والفولت على عازل الخط يتميز بذروة قصيرة للفولت مركبة على فولت المانعة. ومع ذلك، فإن هبوط الفولت على عازل الخط يحدث بعد وصول الموجة المنعكسة من العقدة II، وعلى الأخص -من سعة المعدة- فإن الموجة المنعكسة من المانعة تصل فيما بعد وتؤثر فقط على ذيل الموجة. الحماية الطبيعية للمحطات-الفرعية بواسطة الخطوط الخارجة يمكن أن يكون أكثر فعالية من الحماية بواسطة المانعة في نظام الطرف الهامد، حيث إن معاوقة تمور الخط تكون موصلة منذ بداية العملية وتكون موزعة بين نقط مختلفة من المحطة-الفرعية. وبسبب وجود خطوط خارجة وسعة المعدة، تحفظ الموصلات العمومية الجهد، وترتفع التذبذبات على القطاعات بين العقد I، III، IX وعلى الموصلات العمومية [وليس على المانعة].

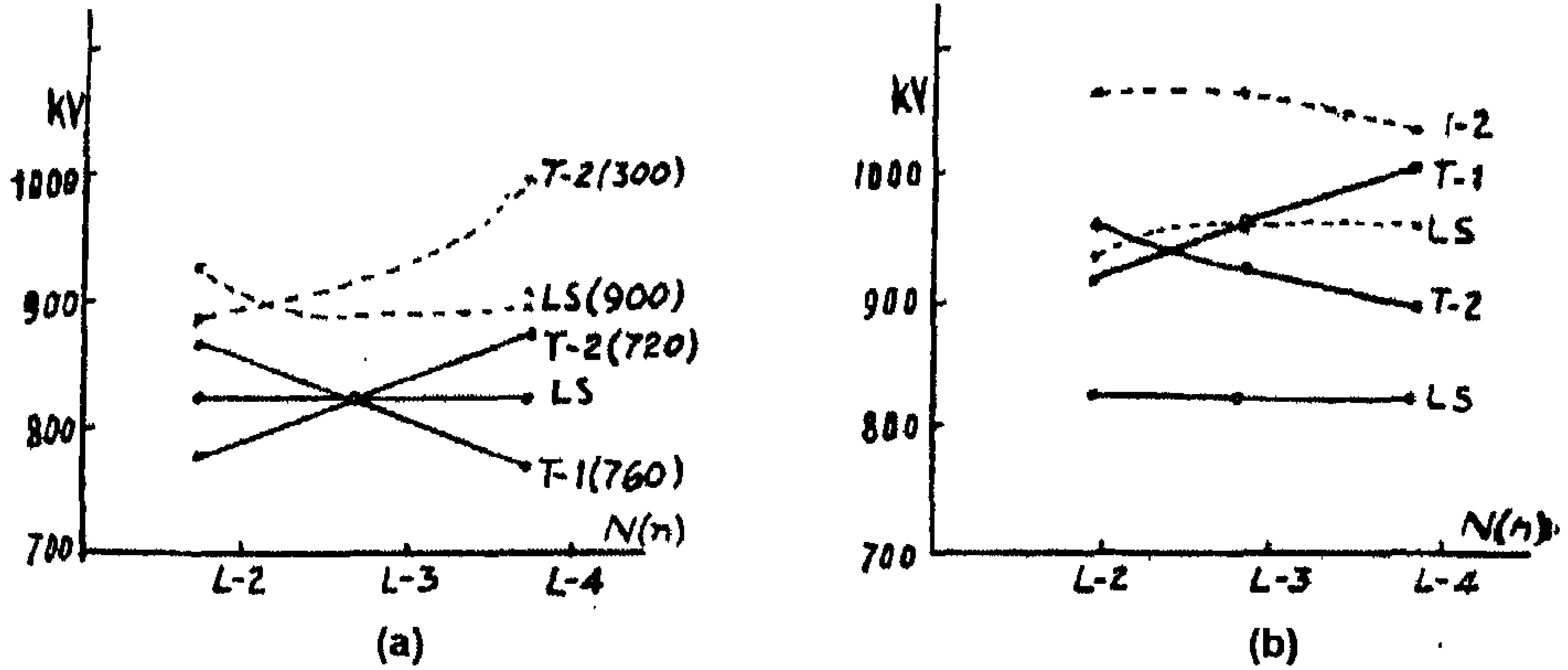


(b)

الشكل 13.20(b): مقطع في معدة توزيع بطول الخط وخلايا المحول



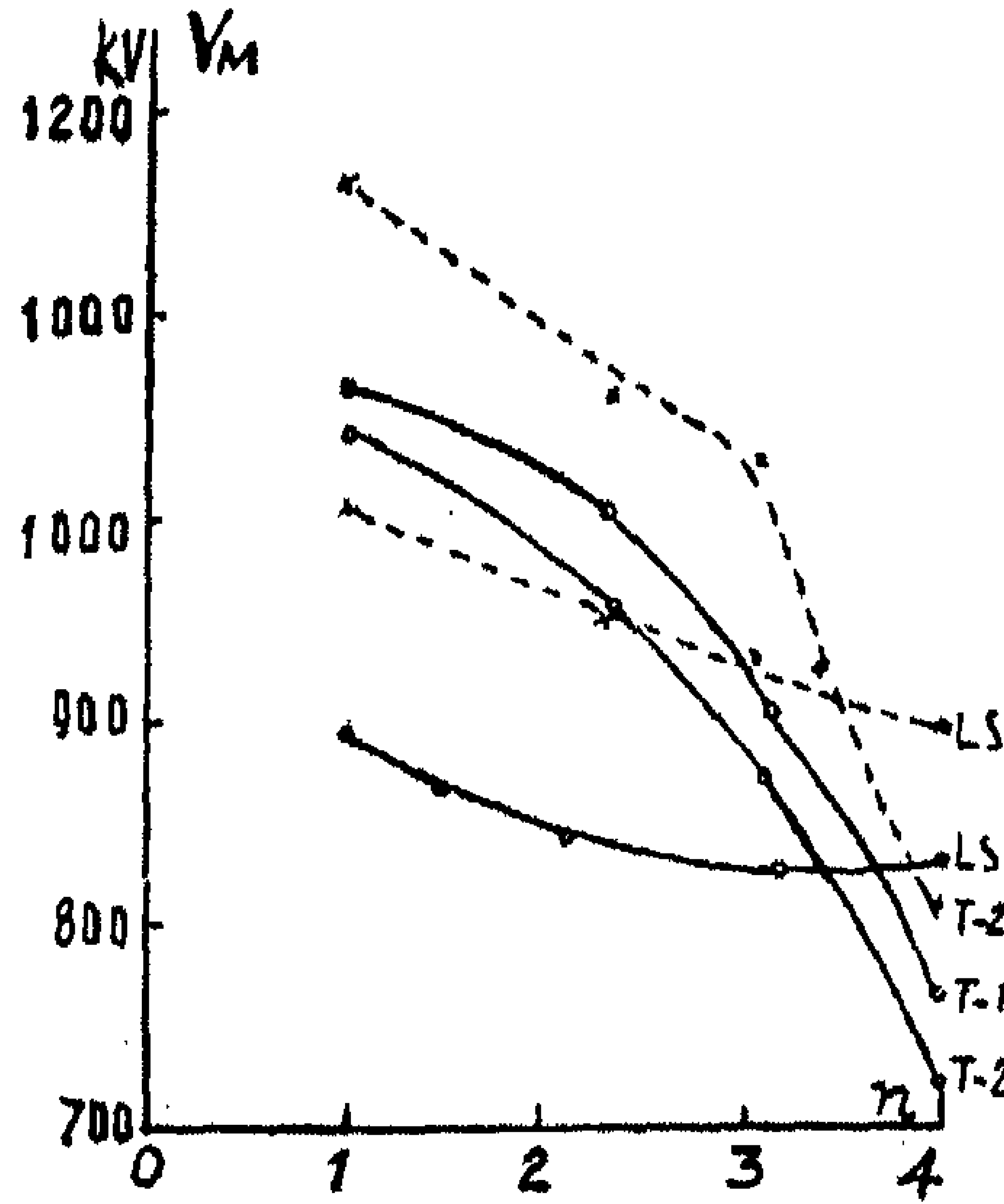
الشكل 13.21 : مخطط مبسط لمحول 220 kV للشكل 13.20 لأبحاث النموذج



الشكل 13.22 : تأثير الخطوط والمحول T -1 على الفولت عند النقط المميزة للمحطة–الفرعية في حالة ارتطام موجة ذو ذروة V_{imp} = 1200 kV وطول الموجة T_f = 1 µ.sec. عبر الخط L -1. (a) اعتماد الفولت على عدد الخطوط المفصولة عندما يكون ثلاثة خطوط موصلة للمحطة–الفرعية؛ (b) اعتماد الفولت على عدد الخطوط الموصلة الثانية عندما يكون خطان موصلان للمحطة–الفرعية؛ T -1 موصل —O—O—O—؛ T -1 غير موصل ...×...×...×...

تأثير الخطوط الخارجة والمحول T-1 موضحة في الأشكال 13.22، 13.23. منحنيات الشكل 13.22(a) موقعة مع ثلاثة خطوط موصلة وتعطي اعتماد الفولت عند النقط المميزة للمحطة–الفرعية على عدد الخطوط المفصولة. في الرسم قيم الفولت مع أربعة خطوط موصلة بينه

بين قوسين. ونرى من المنحنيات أن أقصى فولت على عازل الخط لا يعتمد أو يعتمد قليلاً جداً على عدد الخطوط المفصولة. ولذلك عندما نعتبر الفولت على المحول، فإن ذلك الخط الأقرب من المحول يبذل أكبر تأثير. وهذا يثبت بالمثل بواسطة منحنيات الشكل 13.22(b) حيث الفولتات مع خطين موصلين كدالة في عدد الخط الموصل الثاني، معطى.

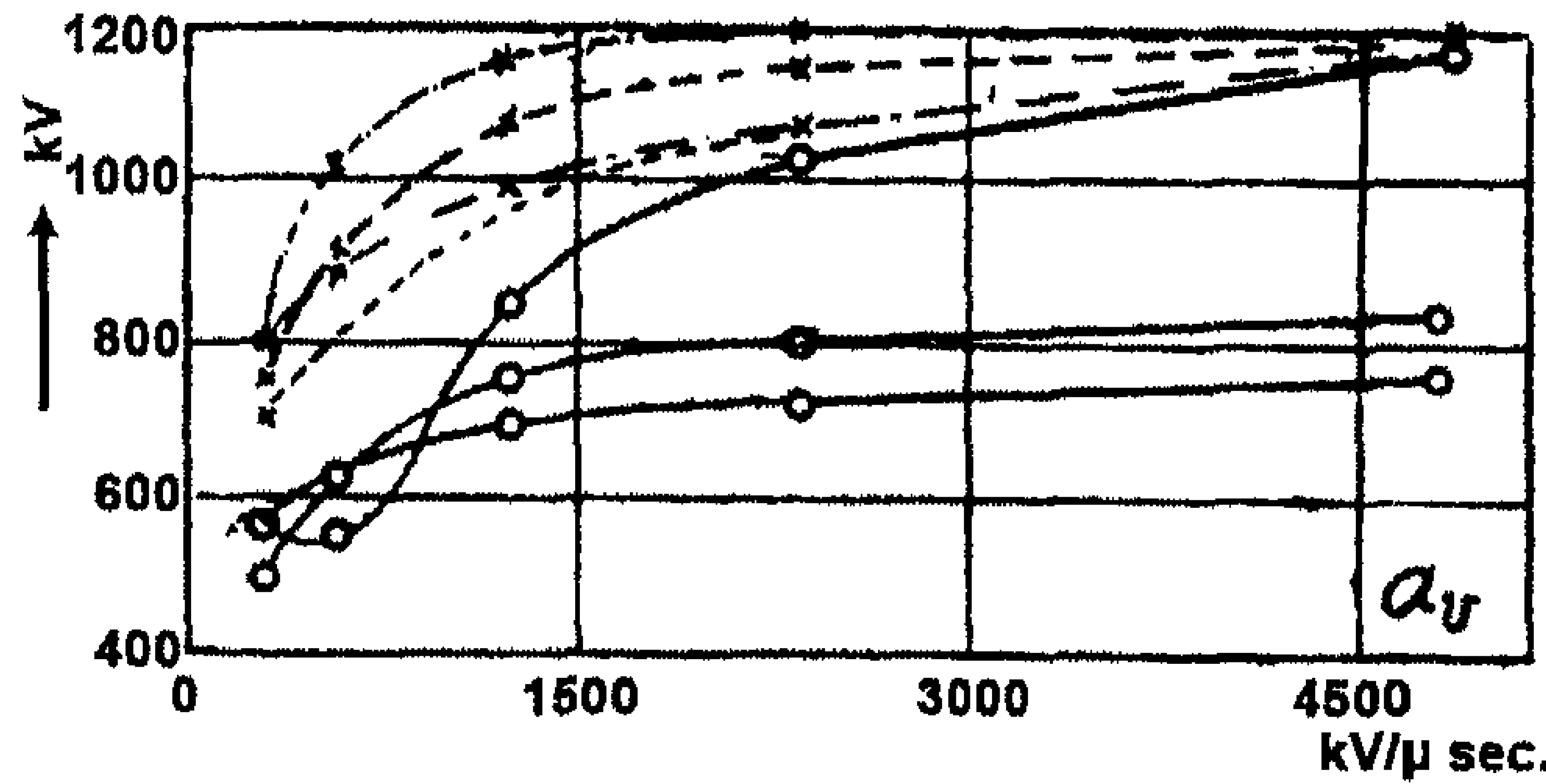


الشكل 13.23: اعتماد الفولت عند النقط المميزة للمحطة الفرعية على عدد الخطوط الموصلة إلى المحطة-الفرعية. 1- T موصل —O—O—O—؛ 1- T غير موصل ...×...×...×...

في الشكل 13.23 معطى اعتماد الفولت الأكبر عند تلك النقط المميزة للمحطة-الفرعية على عدد الخطوط الموصلة. وتبين المنحنيات أن عدد الخطوط الموصلة تؤثر على ذروة الفولت على عازل الخط فقط قليلاً. المحول 1- T يؤثر أكثر. ويشرح ذلك بواسطة حقيقة أنه قبل كل شيء فإن الموجة المنعكسة من العقدة II التي عندها يكون المحول 1- T موصلاً تأتي إلى العقدة I [عازل الخط]. وبسبب وجود سعة في هذه العقدة يبدأ هبوط حاد في الفولت فوراً بعد وصول الموجة المنعكسة، وتؤثر الانعكاسات المتعاقبة على ذيل الموجة وتحد من الفولت بعد شحن السعة عند العقدة II. السعة عند العقدة II تكون أقل مع المحول 1- T مفصول ونشعر بتأثير الخطوط بدرجة أكبر.

يعتمد الفولت على المحولات 1- T، 2- T على عدد الخطوط الموصلة. مع التزايد في عدد الخطوط الموصلة ينخفض انحدار الموجة القادمة إلى المانعة والجهد المتخلف على المانعة، ويزداد

التخميد damping. توصيل المحول T -1 يكون مكافئاً لزيادة السعة بالقرب من أطراف دخل المحطة–الفرعية، السعة الموضوعة قبل المانعة عبر مسار موجة تخفض الانحدار الذي يؤدي إلى تخفيض الجهد الزائد على المحول 2- T.



الشكل 13.24: منحنيات اعتماد الفولت عند النقط المميزة للمحطة–الفرعية على الانحدار. الخط المستمر: مخطط كامل؛ شرطة–نقطة: المحول 1- T مفصول–خط واحد؛ الشرط: المحول 2- T موصل–خطين

في الشكل 13.24، معطى اعتماد الفولت على 1-L، 1- T، 2- T على الانحدار لعدد المحولات الكامل والمخفض والخط. حقيقة أن منحنيات اعتماد الفولت عند المحول على الانحدار تكون مائلة ميلاً خفيفاً في منطقة الانحدارات الكبيرة تجذب الاهتمام. في نظام ذو عدد مخفض من الخطوط ومحول واحد، فإنه يمكن شرحه بحقيقة أن الجهد يقترب من نهايته مرتان قدر الجهد المتخلف للمانعة. في النظام الكامل، فإن التيار خلال المانعة والفولت المتخلف ينخفضان بحدة عند امتصاص التيار بواسطة الخطوط الخارجة، وإلى جانب ذلك فإن جبهة الموجة المخترقة داخل عمق المحطة–الفرعية تنعم كثيراً تحت تأثير الخطوط الخارجة والسعات حيث إنها لا تعتمد على انحدار الموجة المقتربة من المحطة–الفرعية. ولهذه الأسباب فإن الزيادة في المسافة بين الموصلات العمومية والمحول لا تسبب أي زيادة ملحوظة في الفولت على المحول بخلاف الأنظمة الأبسط.

من مقارنة جهد اختبار المحول عند موجة مشطورة [1090 kV] مع أقصى قيمة للفولت حسب منحنيات الشكل 13.24، نرى أن الجهود الزائدة يمكن أن تصل إلى حد خطير عند العدد المخفض من الخطوط الموصلة والمحول فقط –مثلاً– بالنسبة لمحول واحد وخطين، يمكن أن يحدث النظام السابق لزمن طويل في الفترة الابتدائية لعمل المحطة–الفرعية ولزمن قصير

أثناء اضطراب عملها العادي، وعلى الخصوص أثناء صيانة وإصلاح قواطع الدائرة الموصلة بالموصلات العمومية أو نظام واحد من الموصلات العمومية. في هذه الحالات الخطيرة يصبح الانحدار الحرج صغيراً جداً. في النظام الحرج نحصل على قيمة 800 kV/μ sec. للانحدار الحرج [أو 2.6 kV/m]، والذي يقابل طول جبهة 1.5 μ sec. وطول منطقة خطرة يساوي تقريباً 1 km .

يتغير الفولت على عازل الخط بحدة مع زيادة الانحدار. ويمكن إيجاد الانحدار الحرج مباشرة من المخطط البياني. ومع ذلك يمكن أن يقدر أيضاً تقريباً على أساس اعتبارات عامة. فكما أشرنا سابقاً عند انحدار كبير يتوقف ارتفاع الفولت على L-1 بعد وصول موجة من العقدة الأقرب، أي تقريباً:

$$V_{L-1} \cong a_v \frac{2l}{v}$$

حيث l = المسافة من العازل حتى العقدة الأقرب (m).

V_{L-1}= جهد الاختبار V_{test} [أو المتانة المضمونة] ويعبر عن الانحدار خلال ذروة الموجة المرتطمة وطول الجبهة $\tau_f = \gamma_x$ ، وسنحصل على المسافة x ، التي ورائها تكون ضربات الصاعقة خطيرة للمحطة–الفرعية وهي:

$$x = \frac{V_{50\%}}{V_{test}} \cdot \frac{2l}{v} \cdot \frac{1}{\gamma}$$

وعادة $V_{50\%}$، أي فولت الشرر لعزل الخط مع اعتبار تصحيح الظروف الجوية يكون (10–20)% أعلى من المتانة المضمونة أو فولت الاختبار لعازل الخط. لذلك فإن x معبراً عنها بالمتر تساوي:

$$x = 1.2\frac{2l}{0.3\gamma} = \frac{8l}{\gamma}$$

وبوضع

$$\gamma = 1.5 \ \mu \text{ sec./km}$$

و

$$l = 72 \text{ m}$$

نحصل على

$$x = \frac{8 \times 72}{1.5} = 370 \text{ m} = 0.37 \text{ km}$$

طول الاقتراب الحرج المتحصل عليه بعاليه يكون صغيراً جداً، أي الضربات التي في جوار المحطة الفرعية فقط هي التي تكون خطيرة. ولكن لعدد كبير n من الخطوط، فإن حاصل الضرب nx يمكن أن يتحول ليكون أكبر من طول المنطقة الآمنة التي وجدت من النظام الحرج.

إذا كانت المحطة–الفرعية لها نظام موصل–عمومي مزدوج فإن الطول الإجمالي للموصل العمومي في النظام الواقي سيزداد، حيث طول الموصلات في قطاع الموصل العمومي الذي يوصل قاطع الدائرة يكون حوالي 100 m .

في المبدأ، اعتمادية الحماية من الصواعق لمحطة–فرعية حيث توصيل المحولات إلى الموصلات العمومية لمعدة توزيع مفتوحة ينفذ بكابلات H.V يجب أن يُقدر بشكل مختلف. في البند ١٣–٤ وضحنا أن فولت المحول الموصل خلال كابل لا يعتمد على الانحدار بل على ذروة وطول الموجة المرتطمة، أي بدلاً من الشرر المرتد قريباً من المحطة–الفرعية، فإن انفصال الصواعق عبر الطول الكلي للخط أو الضربات المباشرة للموصل لا تصاحب بشرر للأرض، إذا كان الخط ليس له أسلاك أرضية عبر طوله، تكون خطيرة. لتحديد اعتمادية الحماية من الصواعق، يجب رسم علاقة أقصى فولت للمحول على ذروة الموجة المرتطمة لأطوال موجية كبيرة μ sec. (50–40) وتقارن قيم الفولت المتحصل عليها مع المتانة الدفعية للمحول والكابل عند موجة كاملة، حيث تقاس نصف فترة ذبذبات الجهد على المحول ليس بالميكروثانية بل بـ $1/_{10}$ من الميكروثانية.

فحصنا فيما سبق أمثلة للمحطات–الفرعية التي فيها موقع المانعة كان ثابتاً وكانت المشكلة هي فقط إيجاد دليل جودة مقاومة الصواعق للمحطة–الفرعية، أي عدد سنوات العمل بدون أخطاء. أثناء تصميم المحطات–الفرعية، من الضروري تنفيذ تقديرات مشابهة واختيار مكان المانعة ذات دليل جودة مقاومة الصواعق الأكبر. في المحطات–الفرعية ذات الطرف الهامد، يكون من المميز تحديد موقع المانعة عند مركز ثقل المحطة–الفرعية تقريباً، أي عند مسافات متساوية من نقطها البعيدة. في المحطات–الفرعية المتوسطة، يمكن أن يكون الموقع الأكثر تميزاً للمانعة مختلف بسبب تأثير الخطوط الخارجة.

في المحطات–الفرعية ذات الأنظمة المعقدة عندما تكون المسافات بطول الموصلات–العمومية كبيرة جداً، فإن تركيب مانعة واحدة فقط يمكن أن يضمن دليل منخفض جداً لجودة مقاومة الصواعق وأي مجموعتان من المانعات يصبح ضرورياً، وتحدد مواقعها المميزة تجريبياً.

طريقة البحث التجريبي للمحطة–الفرعية على النماذج السابق وصفها يجب أن تستخدم لكل المحطات–الفرعية المصممة. ومع ذلك، وبسبب نقص محللي الحماية من الصواعق، نفذت الأبحاث فقط لأنظمة الطرف الهامد، وبالتناظر معها يمكن تصميم حماية لمحطات فرعية مماثلة.

١٣-٧ حماية الآلات الدوارة من الصواعق Lightning Protection of Rotating Machines

١٣-٧-١ معلومات عامة General Information

حماية الآلات الدوارة [مولدات، محركات] ضد الصواعق تتم أساساً بنفس طريقة المحطات–الفرعية ولكن عزل الآلات يكون له متانة دفعية مضمونة أصغر من محول له نفس الفولت الاسمي. قيم المتانة الدفعية المضمونة $V_{g.s} = V_{test}/1.15$ guaranteed impulse strength من عزل المولدات والمحولات معطاة في الجدول 13.3، والذي يشمل أيضاً الجهود المتخلفة على مانعات الصمام الآلي AVA العادية والمانعات مع إطفاء مغنطيسي للقوس عند تيار 5000 A .

الجدول 13.3 : تنسيق عزل المحولات والآلات الدوارة المقننة عند (3–10) kV

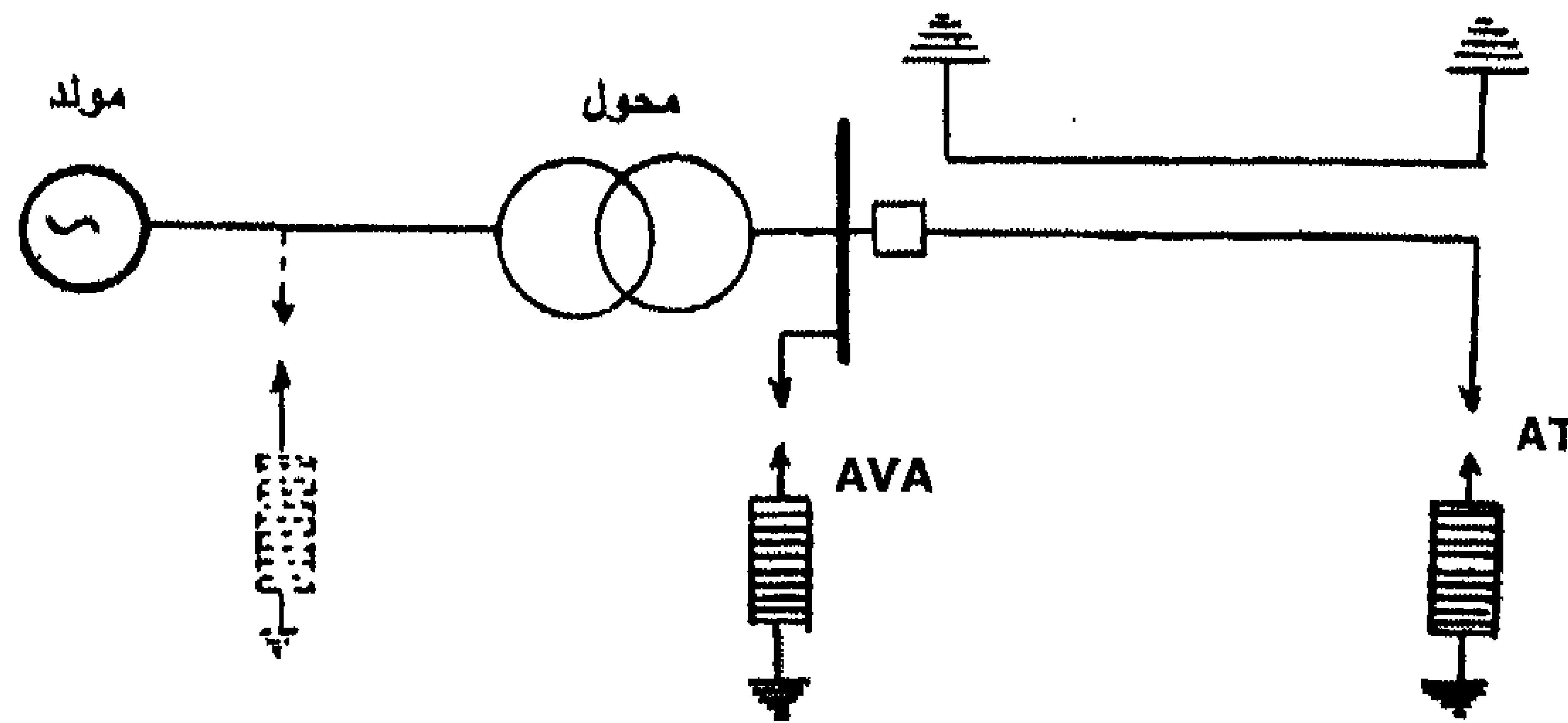
الكمية	المعدة	الجهد الاسمى (kV)		
		3	6	10
المتانة الدفعية المضمونة	محولات	36.5	49.5	65
kV_{max}	مولدات	10	21	32.5
الجهد المتخلف لمانعات الصمام الآلي	PBC	14.5	27	45
	PBBM (for 3000 A)	12	23	38
	مع إطفاء مغنطيسي	9.5	18	30

من الجدول 13.3 نرى أن حماية المحولات من kV (3–10) تكون معتمد عليها بمساعدة مانعات عادلة من سلسلة PBC، حيث إن الجهد المتخلف على المانعة يكون أقل من المتانة الدفعية المضمونة للعزل [لفولت 3 kV يكون 2.5 مرة وبالنسبة لـ 10 kV حوالي 30%]. المانعات الخاصة من سلسلة PBBM لا تضمن حماية المولدات، حيث إن الفولت المتخلف عليهم يتعدى المتانة الدفعية المضمونة لعزل المولد. المانعات الجديدة مع إطفاء قوس مغنطيسي لها خصائص أفضل –ومع ذلك– فإنها تضمن أيضاً %(10–5) زيادة في متانة العزل فوق الفولت المتخلف على المانعات. من الطبيعي في هذه الظروف أن نحاول دائماً الحد من احتمال حدوث الجهود الزائدة الجوية على عزل المولد بتجنب اتصالهم المباشر بالخطوط الهوائية (العلوية).

١٣-٧-٢ الحماية من الصواعق للمولدات التي تعمل على خطوط هوائية خلال محولات

Lightning Protection of Generators Working on Overhead Lines Through Transformers

مولدات محطات القدرة الكبيرة، وخاصة تلك التي تعمل حسب نظام وحدة توصل عادة بالخطوط الهوائية خلال لفات محول [الشكل 13.25]. وتتم حماية جانب الجهد العالي من الجهود الزائدة الجوية طبقاً لقواعد حماية المحطات-الفرعية من الصواعق -وبالتالي- يمكن التأثير بجهد سعته [ذروته] لا تتعدى جهد الاختبار للمحول المعطى، على لفات الجهد العالي للمحول. وأثناء ذلك، فإن جزء معين من هذا الجهد والذي سوف يرسل إلى لفات الجهد المنخفض من لفات الجهد العالي، سيؤثر على عزل المولد. وتوجد طريقتان لنقل الموجة خلال لفات المحول:

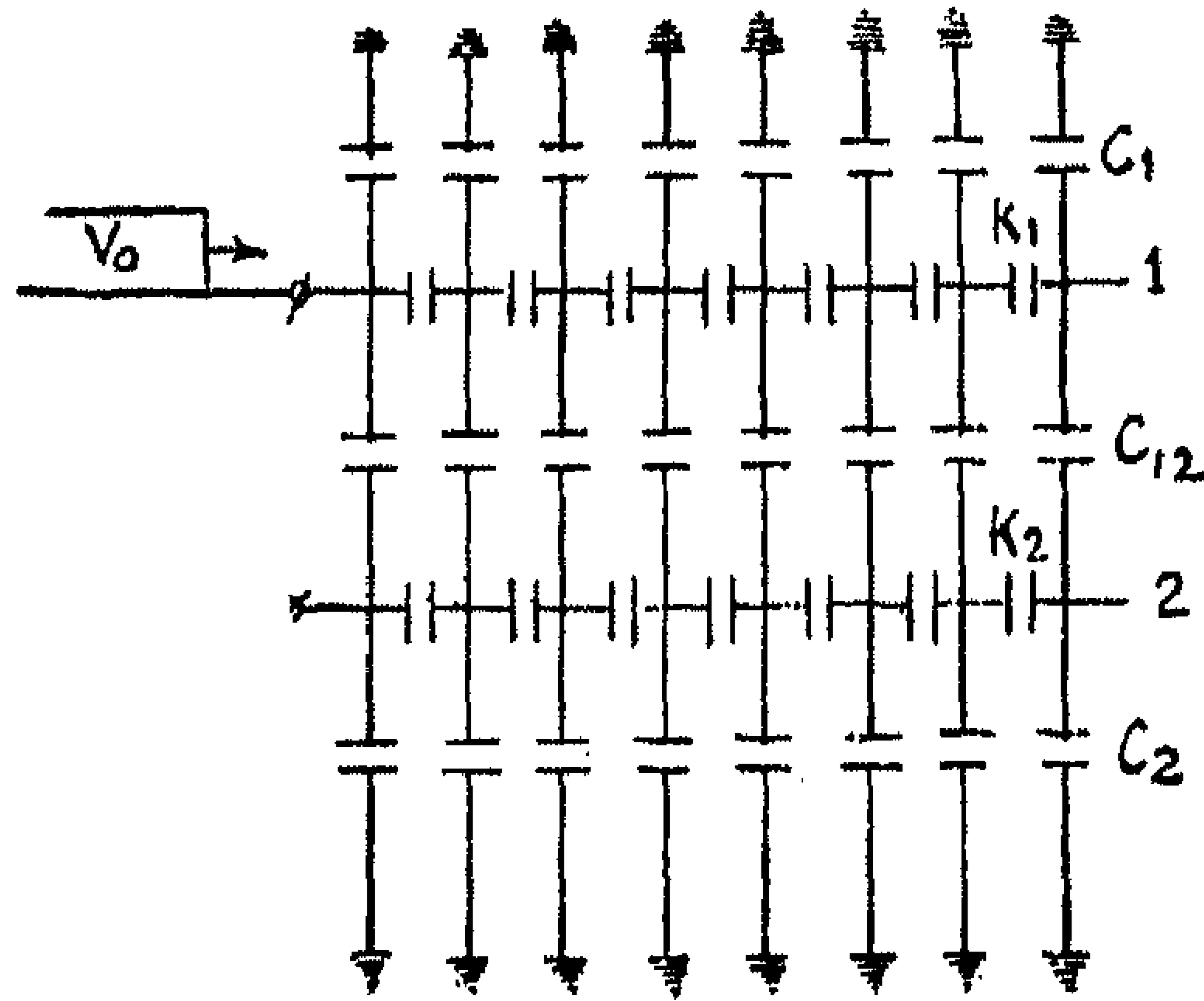


الشكل 13.25: مولد تيار متردد موصل بخط نقل هوائي من خلال محول

(أ) النقل السعوي للجهد خلال لفات المحول

Capacitive Transmission of Voltage through Transformer Windings

في الفصل ٩ أشرنا إلى أنه عندما تؤثر موجة دفعية على محول، ينشأ توزيع الجهد المحدد بسعات اللفات في اللفات -التي- فيما بعد - تتغير باستمرار بسبب نمو ذبذبات طبيعية. ومع ذلك، بواسطة لحظة أقصى جهد والتي تحدث عادة في حدود عدد قليل من الميكروثانية، يبقى توزيع الجهد قريباً من التوزيع الابتدائي -والذي في الحقيقة- يسمح باستبدال المحول بسعة دخله أثناء تحليل نظام حماية المحطة-الفرعية. في محول ملفان، إلى جانب سعات التوالي والأرضي، توجد سعات بين اللفات أيضاً وهي موزعة أيضاً، لذلك فإن الدائرة السعوية الكاملة لمحول يكون لها الشكل المبين في الشكل 13.26 حيث: 1- لفات الجهد العالي، 2- لفات الجهد المنخفض.



الشكل 13.26: دائرة السعة لمحول من ملفين. (1) لفات الجهد العالي؛ (2) لفات الجهد المنخفض

إذا كانت سلسلة السعات K_2 للفات الجهد المنخفض صغيرة لدرجة الإهمال، فإن كل عنصر من هذه اللفات سيكون مستقلاً عن الآخر وسيكون من المكن حساب الفولت عند أي نقطة منه حسب العلاقة:

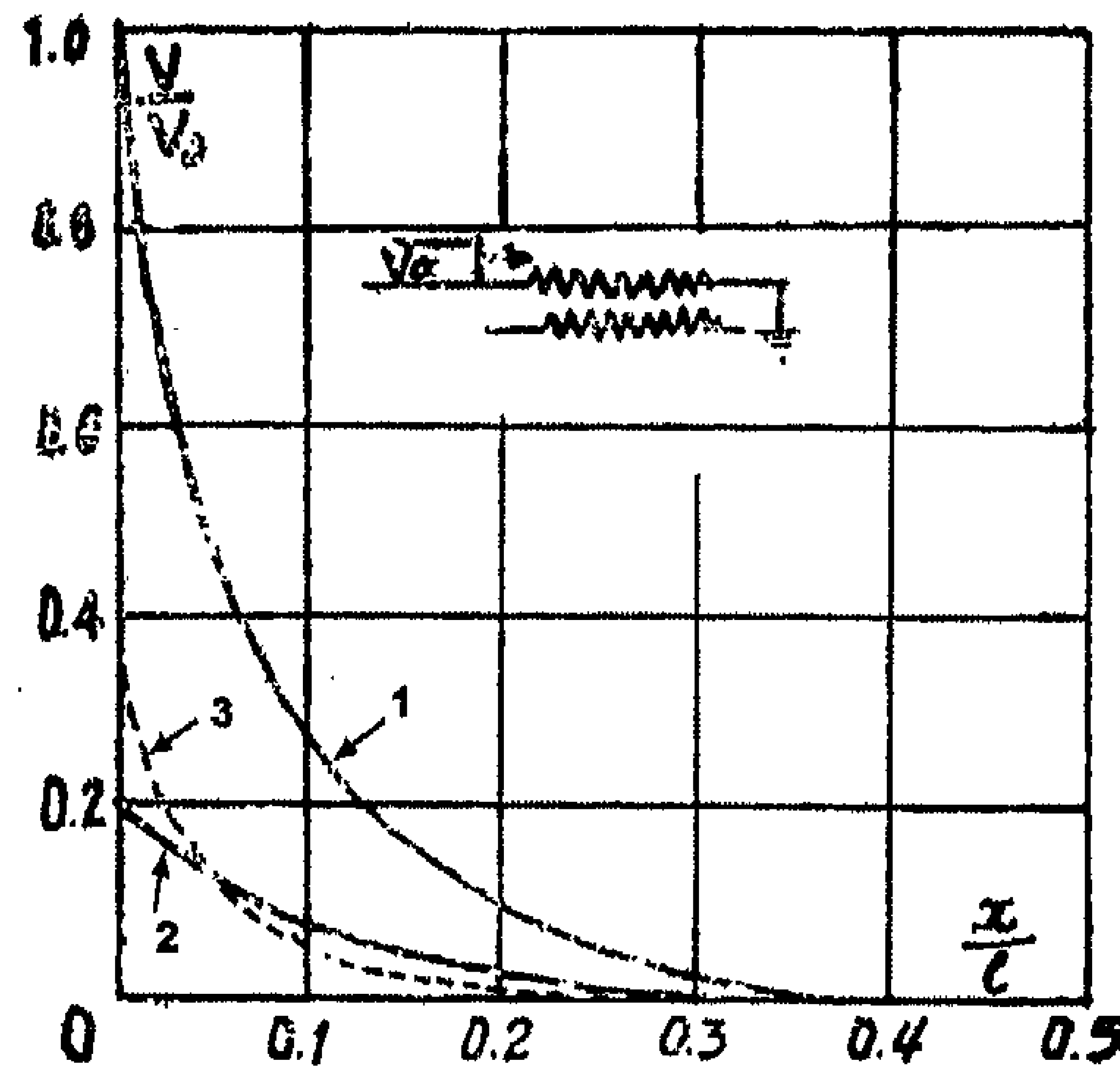
$$V_2(x) = V_1(x)\frac{C_{12}}{C_2 + C_{12}} \tag{10.13}$$

في الحقيقة، بسبب وجود تقارن بين العناصر المنفصلة للفات L.V، يحدث إعادة توزيع للجهد ويكون توزيع الجهد في اللفات الثانوية ذو خصائص مختلفة عن ذلك الذي في الابتدائي. الحسابات المطلوبة لهذه الحالة تكون كبيرة الحجم وهي غير معطاة في هذا الكتاب، حيث إن المعادلة (13.10) تعطي فكرة دقيقة عن حدود قيم الجهد الثانوي.

ويعطي الشكل 13.27 توزيع الجهد عبر كل من لفات المحول. من هذه المنحنيات نرى أن الحسابات حسب المعادلة (13.10) تعطي قيمة متزايدة عن الجهد في بداية اللفات وقيم منخفضة إلى حد ما عند نهاية اللفات.

يجب أن نتذكر أن المعادلة (13.10) وأيضاً منحنيات الشكل 13.27 هي لحالة لفات L.V للدائرة المفتوحة للمحول. في الحالة التي تعنينا، تكون موصلة لمولد، أي سعة المولد وكل الموصلات العمومية الموصلة والكابلات توصل سعة إضافية C على التوازي مع C_2. إذا كانت C_2، C_{12} هي سعات مجمعة، فإن الجهد عند أطراف المولد في هذه الحالة سيكون مساوياً للآتي:

$$V_2 = V_1 \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2 + C} \tag{11.13}$$



الشكل 13.27: توزيع الجهد عبر لفات المحول [$C_1 = 2000\ pF$ ، $C_2 = 6000\ pF$ ، $C_{12} = 300\ pF$ ، $K_1 = 20\ pF$ ، $K_2 = 30\ pF$]. (1) اللفات الابتدائية؛ (2) حسابات اللفات الثانوية حسب الطريقة الصحيحة؛ (3) حسابات اللفات الثانوية حسب المعادلة (13.10)

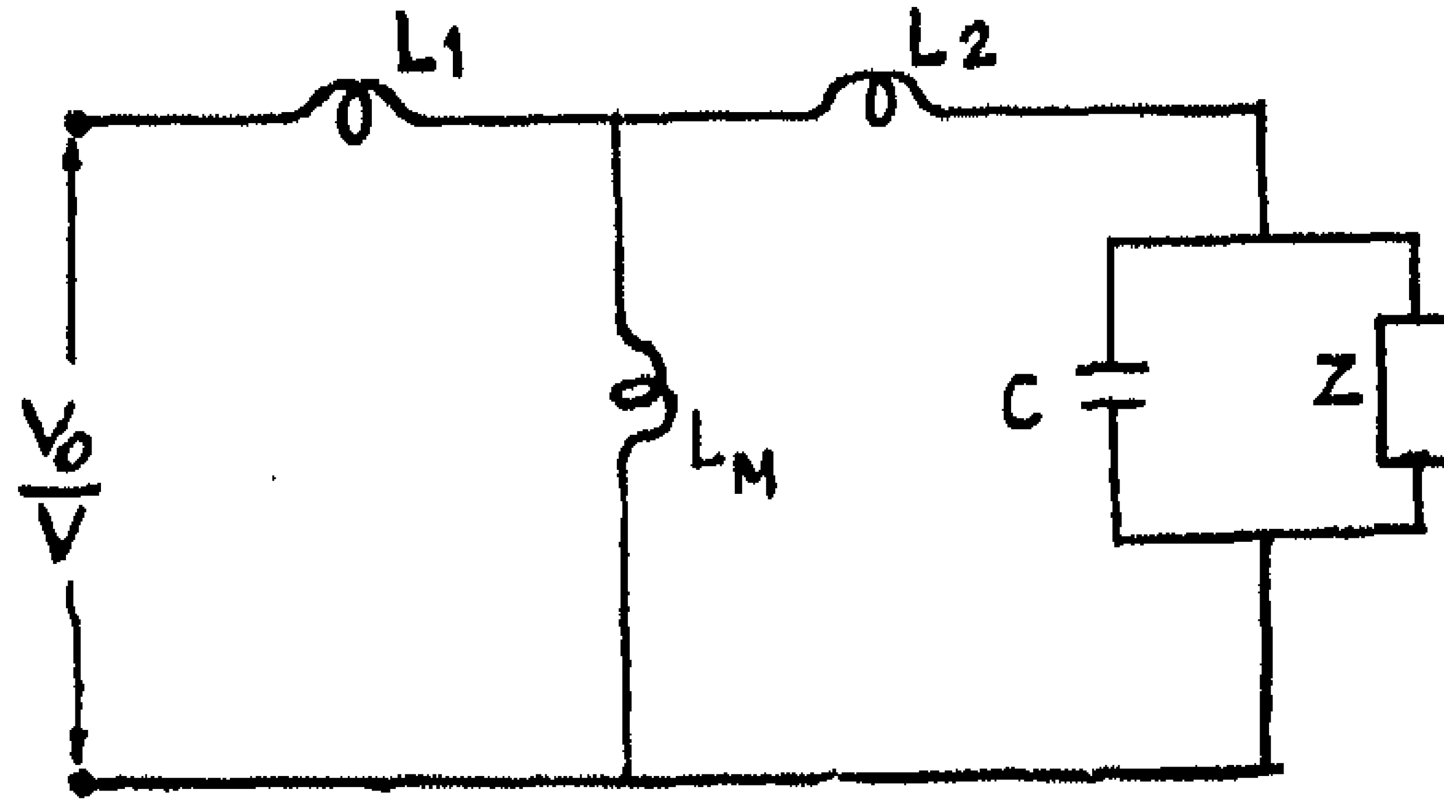
أي أن توصيل –مثلاً– السعة $C = (C_2 + C_{12})$ إلى أطراف المولد ستخفض الجهد إلى النصف. وفعلياً فإن تأثير السعة، الموصلة لأطراف اللفات الثانوية يبقى أكبر. ونرى من الشكل 13.27 أن هناك جهد محسوس مستحث في $1/5$ اللفات فقط. وبالتالي فبدلاً من كل السعات C_{12} ، C_2 يأخذ $1/5$ فقط من هذه السعة دوراً في نقل الجهد. لذلك، فإن توصيل سعة إضافية $C = (C_2 + C_{12})$ سيخفض الجهد ليس إلى النصف ولكن على الأقل إلى $(1/6 - 1/5)$. وحيث إن القيمة المطلقة لسعة لفات الجهد المنخفض ليست كبيرة، فإن وجود قطاعات قصيرة من الكابلات [في حدود أعشار قليلة من المتر] تخفض الجهد إلى قيمة مطلقة الأمان لعزل المولد.

(ب) النقل الكهرومغنطيسي للجهد خلال لفات محول

Electromagnetic Transmission of Voltage through Transformer Winding

إذا تحدد نقل الجهد خلال تقارن سعوي بواسطة التوزيع الابتدائي، يكون النقل الكهرومغنطيسي الذي يحدث أثناء عملية الذبذبات الطبيعية ذات أهمية أساسية. وهذه الحقيقة تسمح باستخدام الدائرة المكافئة العادية الموضحة في الشكل 13.28 للتحليل التقريبي. في هذا الشكل L_1 ، L_2 هما محاثات تسرب اللفات الابتدائية والثانوية، L_M هي محاثة المغنطة،

C السعة الإجمالية الموصلة على جانب الجهد المنخفض [شاملة سعة اللفات نفسها]، Z هي معاوقة تمور لفات المولد.



الشكل 13.28: الدائرة المكافئة لتحليل النقل الكهرومغنطيسي للجهد خلال لفات المحول

إذا كانت السعة C تساوي صفر، فإن الجهد على اللفات الثانوية، باعتبار أن $L_M \gg L_1+L_2$ عندما تؤثر موجة مستطيلة ذات ذروة V_0 على اللفات الابتدائية، يكون مساوياً للآتي:

$$v_2 \cong \frac{V_0}{n}\left(1-\epsilon^{-t/T}\right) \qquad (12.13)$$

حيث n = معامل التحويل.

$$T = L_1 + \frac{L_2}{Z}$$

محاثة تسريب المحول منسوبة إلى جانب الجهد المنخفض

$$L_1 + L_2 = \frac{e_K\% V_N^2}{P_N \times 31.4}$$

حيث V_N= الجهد الاسمى (kV).

P_N = السعة المقننة (kVA).

فمثلاً، بالنسبة لمحول 121/10 kV، 31500 kVA $L_1+L_2=10^{-3}$ H. معاوقة تمور مولد من هذه السعة له قيمة حوالي 40 Ω . وبالتالي، فإن الثابت الزمني T يكون في حدود 25 μ sec.

نعلم أن الجهد على المحول يتكون من جهد متخلف من المانعة مع ذبذبات مركبة عليه، فترته الزمنية تكون قليل من الميكروثانية، أي أقل من الثابت الزمني T. لذلك فإن هذه

الذبذبات ستنعم أثناء النقل خلال لفات المحول وقيمة V_0 يجب أن تؤخذ كقيمة الجهد المتخلف على المانعة المركبة على الجانب H.V.

إذا كانت السعة C على الجانب L.V مختلفة عن الصفر، تنتج ذبذبات طبيعية لها تردد $\omega = 1/\sqrt{C(L_1 + L_2)}$ في الدائرة، والتي تركب على الجهد V_0/n. ويمكن أن يصل الجهد على المولد إلى قيمة $2V_0/n$. ومع ذلك، مع اعتبار تأثير التخميد لمعاوقة تمور المولد، فإن هذه الذبذبات تعتبر مخمدة وفي معظم الحالات تخمد تماماً. ولتخميد الذبذبات في دائرة الشكل 13.28 –كما هو معروف– فإن الشرط الآتي يجب أن يتحقق:

$$Z < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C}}$$

في المثال المأخوذ في الاعتبار ستخمد الذبذبات في كل الحالات، عندما تكون السعة:

$$C < \frac{L_1 + L_2}{4Z^2} = \frac{1000}{4 \times 1600} = 0.15\ \mu\text{F}$$

وتتحقق تلك المتباينة في معظم الحالات ولكن من هذا المثال نرى أن السعات الكبيرة بشكل غير عادي على الوصلات العمومية يمكن أن يكون لها تأثير ضار.

إذا افترضنا أن الذبذبات الطبيعية في دائرة اللفات الثانوية خمدت، لا يكون مطلوب حماية إضافية على جانب جهد المولد، عندما تركب مانعات صمام–آلي–مغنطيسية حديثة على الجانب H.V. في الحقيقة –مثلاً– بالنسبة لمحول 121/11 kV، $n = 11$، $V_{res} = 265$ kV [الجدول 13.3] وأقصى جهد على لفات المولد ستساوي:

$$V_{2max} = \frac{265}{11} = 24\ \text{kV}$$

والتي هي طبقاً للجدول 13.3، تكون آمنة لعزل مولد ذات جهد اسمى 10 kV . لذلك، يعتقد عادة أن المولدات الموصلة مع الخطوط الهوائية بمساعدة محولات لا تتطلب أي حماية إضافية ضد الصواعق ومانعات الصمام الآلي AVA يمكن أن لا تركب على جانب جهد المولد. ومع ذلك، يجب أن نتذكر هنا إمكانية وجود حالات [سعة كبيرة عند الوصلات العمومية، مولدات سعة صغيرة] والتي فيها يمكن ألا تخمد الذبذبات الطبيعية للدائرة الثانوية ويتعدى الجهد على المولد القيمة المسموحة. في هذه الحالات من الضروري تركيب مانعات على المولدات أيضاً.

١٣-٧-٣ الحماية من الصواعق للمولدات الموصلة مباشرة بخطوط النقل الهوائية

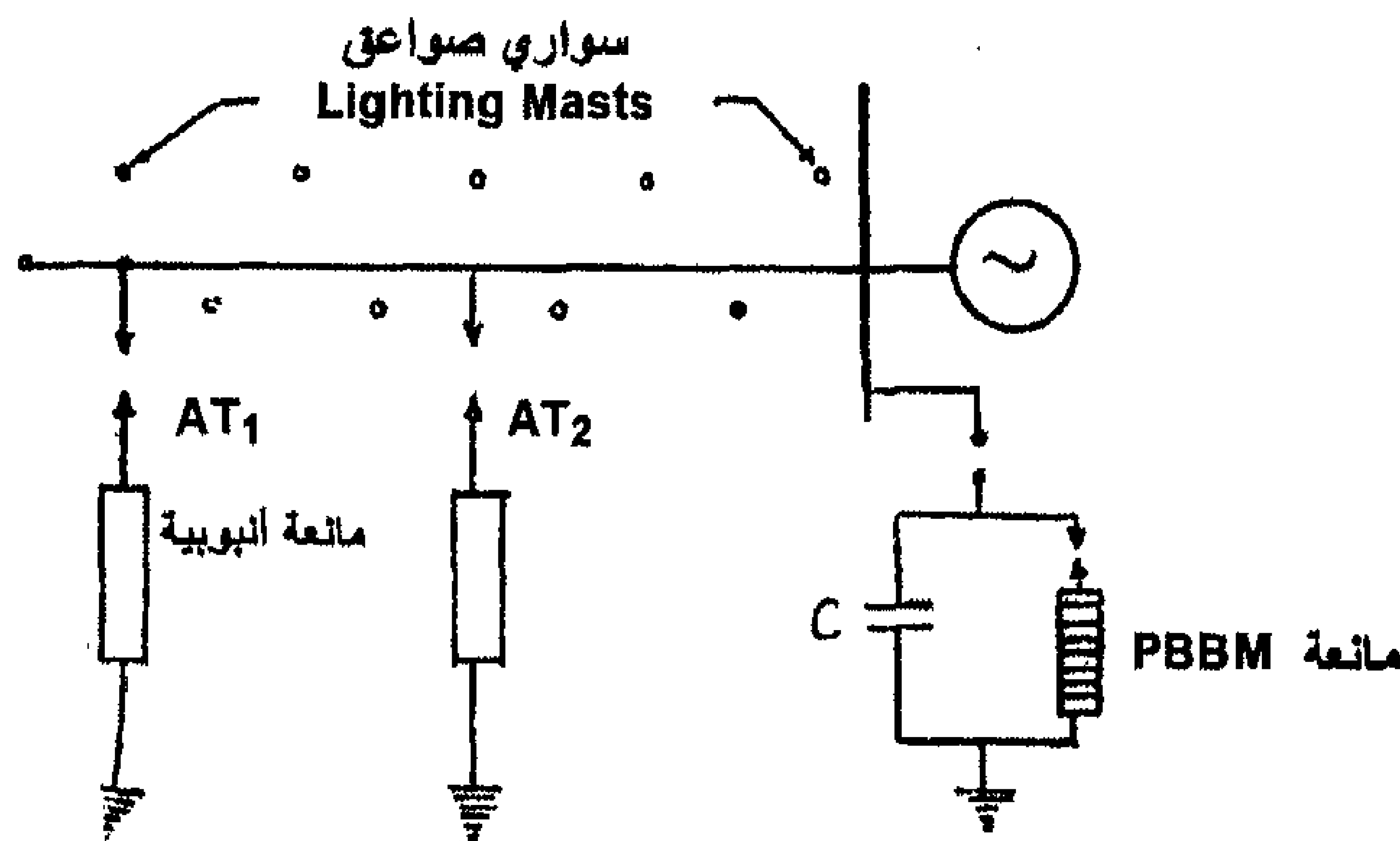
Lightning Protection of Generators Connected Directly to Overhead Transmission Lines

الحماية من الصواعق للمولدات المتصلة مباشرة بخطوط النقل الهوائية يمكن -من حيث المبدأ- أن تتحقق بواسطة الوسائل المستخدمة لحماية محطة-فرعية، أي تقام مانعات صمام-آلي AVA على الموصلات العمومية لجهد المولد، وعلى الخط المقترب، عند بدايته تقام مانعة من طراز الأنبوبة، تزود أسلاك أرضية عبر طول km (2-1) من الخط. ومع ذلك، عند تنفيذ ذلك، تحدث الخصائص التالية في نظام الحماية للآلات الدوارة:

١. يجب تركيب مانعة صمام-آلي من طراز خاص أساساً مع إطفاء-قوس مغنطيسي.

٢. حيث إن اقتراب الخط من المحطة-الفرعية يمر عادة خلال مناطق سكنية، فإن الحجب الطبيعي له من ضربات الصواعق المباشرة تكون مكفولة. إذن حماية الاقتراب في معظم الحالات يكون غير مزود. وفي تلك الحالات التي يمر فيها الاقتراب خلال مناطق غير سكنية، فإن الاقتراب يجب أن يُحمى بواسطة ساري صواعق أو أسلاك أرضية.

٣. بالإضافة لـ AVAs، تركب سعات لها سعة 0.5 µF لكل طور، لتحديد انحدار الجهد عند أطراف المولد.



الشكل 13.29 : نظام وقاية مع اقتراب خط هوائي إلى المحطة

ويوضح الشكل 13.29 نظام حماية المولد، الموصل مباشرة بخط النقل الهوائي.

مانعات الصمام-الآلي المعنية لحماية الآلات الدوارة لها جهد متخلف أصغر، عند تيار دفعي في حدود 5 kA فإن أقراصها تمتلك مقاومات منخفضة [Ω (6-2) حسب الجهد

الاسمي]. ولذلك لكي نحد من قيمة التيار خلال AVA، يجب أن يكون أساسياً جعل مقاومة تأريض مانعة أنبوب الطرد صغيرة جداً [أقل من 1 Ω].

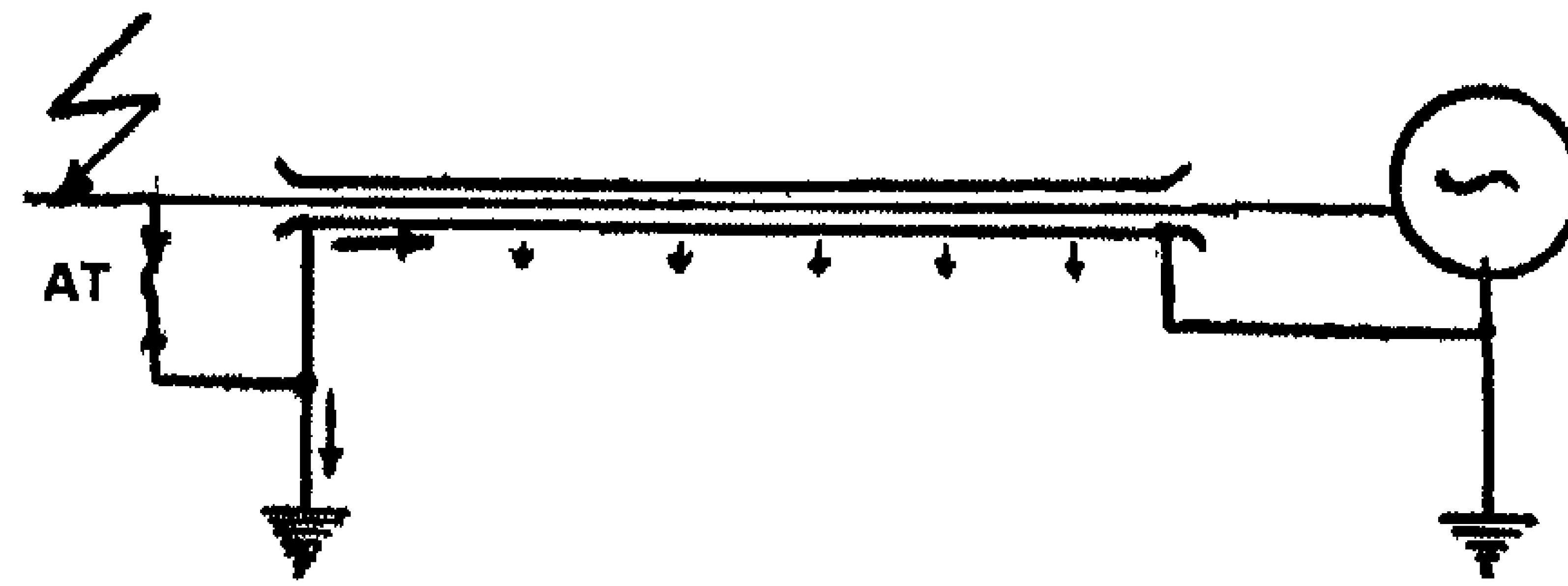
وحيث إنه من غير الممكن عملياً الحصول على تلك القيمة الصغيرة من مقاومة التأريض، فإنه يجب تركيب (3–2) مجموعة من مانعات أنبوب الطرد، لها مقاومة تأريض في حدود 3 Ω لكل، عند الاقتراب. ومع ذلك، حتى هذه المقاومة يمكن الحصول عليها في أنواع التربة الجيدة بمساعدة شبكة تأريض معقدة. لذلك –عملياً– تستخدم غالباً قيم أكبر من المقاومة وعلى أساسها تنخفض اعتمادية النظام بحدة. إلى جانب ذلك، في وجود عدد من مجموعات مانعات أنبوب الطرد، يمكن أن تكون هناك حالات عندما تعمل واحدة منهم فقط، تأريض واحد فقط سيقوم بدورة في حمل تيار الصاعقة بعيداً إلى الأرض والقيمة المطلوبة من التيار خلال AVA لن نتحصل عليها.

في هذا الأسلوب، العوائق الرئيسية في خلق نظام يعتمد عليه للحماية مع توصيل مولد مباشرة للاقتراب الهوائي هي استحالة خلق تأريض واحد له مقاومة تأريض أقل من 1 Ω والحصول على جهود تفريغ منخفضة بشكل كافي لمانعات أنبوب الطرد الموجودة، والتي على أساسها فإن تشغيل كل المانعات المركبة على الاقتراب ليست مضمونة في كل الحالات.

من الحقائق –طبعاً أن تخفيض التيار خلال AVA على الموصلات العمومية لا يمكن الحصول عليه بواسطة تخفيض مقاومة التأريض لمانعة أنبوب الطرد فقط ولكن أيضاً بزيادة طول الاقتراب. مع ذلك، لهذا سيكون أساسياً زيادة طول الاقتراب إلى كيلومترات قليلة، أي عملياً نعتبر كل الخط يكون الاقتراب. حماية الخط بواسطة سواري الصواعق عبر طوله الكلي سيحل –طبعاً– مشكلة حماية للمولدات كلياً. ولكن ذلك غير معقول على الإطلاق بسبب الاعتبارات الاقتصادية.

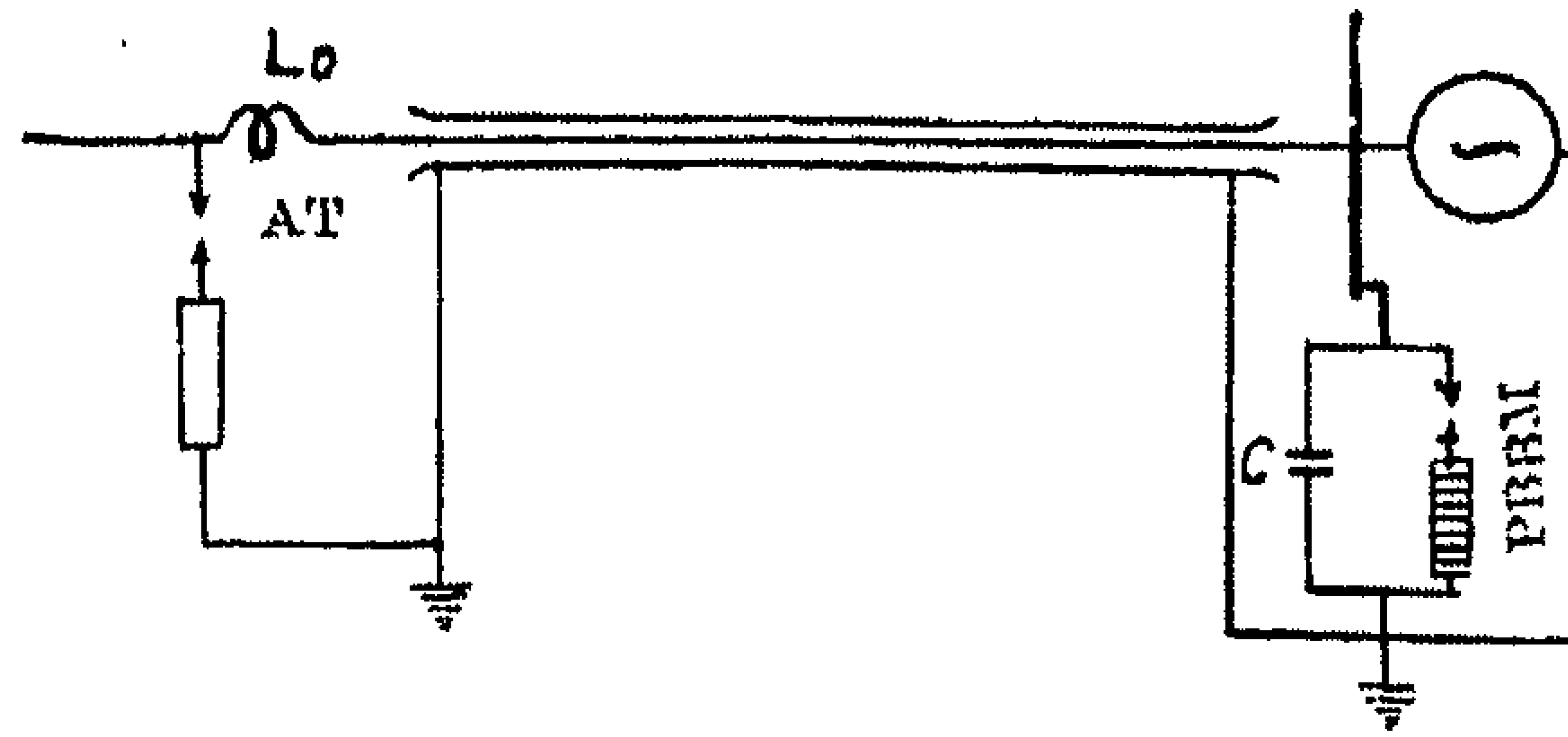
نادراً ما تؤخذ خطوط النقل الهوائية مباشرة في تركيبات توزيع المحطات. ففي معظم الحالات يستخدم كابل طوله 50 m أو أكثر بين الخط والمحطة. وجود طول الكابل هذا يفتح إمكانيات إضافية قليلة لحماية الآلات الدوارة من الصواعق. إذا ركبت مانعة أنبوبية الطراز AT عند مكان التحول من خط هوائي إلى خط كابل [الشكل 13.30]، فعند تشغيل هذه المانعة يحدث أن يكون قلب core الكابل استمرار لغلاف الكابل ويحصلان على جهد متساوي بالنسبة للأرض. تحت فعل هذا الجهد سترحل موجة تيار بطول الكابل في اتجاه المحطة. وكنتيجة للظاهرة السطحية skin effect، سيمر هذا التيار خلال غلاف الكابل فقط، وسيكون التيار في

القلب غائباً. إذا تم مد الكابل في الأرض مباشرة، فإن جزء من التيار سيمر من الغلاف إلى الأرض بطول المسار إلى المحطة وسيكون الجزء المتبقي من التيار مقصراً خلال كنتور تأريض المحطة. إذا كانت المقاومة الفعالة للغلاف تساوي صفر، فإن القلب سيأخذ جهد الغلاف عبر الطول الكلي للكابل وسيكون الجهد بينهما غائباً. في وجود مقاومة فعالة للغلاف، ينشأ جهد بينه وبين القلب والذي يساوي هبوط الجهد في هذه المقاومة الفعالة بسبب التيار المار في الغلاف. حيث إن المقاومة الفعالة لغلاف الكابل تشكل كسر من الأوم لكل كيلومتر، قيمة هبوط الجهد هذا حتى لتيارات صواعق كبيرة وأطوال كابل كبيرة تكون أقل من المتانة الدفعية لعزل الآلة الكهربية. إذا كان عند نهاية المحطة، قلوب الكابل موصلة مباشرة بلفات الآلة والغلاف بكنتور التأريض وهيكل المولد، فإن الجهد على عزل المولد لن يتعدى القيم المسموحة. وبهذه الطريقة، فإن النظام مع أطوال كابل في شروط التشغيل المعتمد عليه لمانعة أنبوب طرد يمتلك مستوى عالي جداً من مقاومة الصواعق.



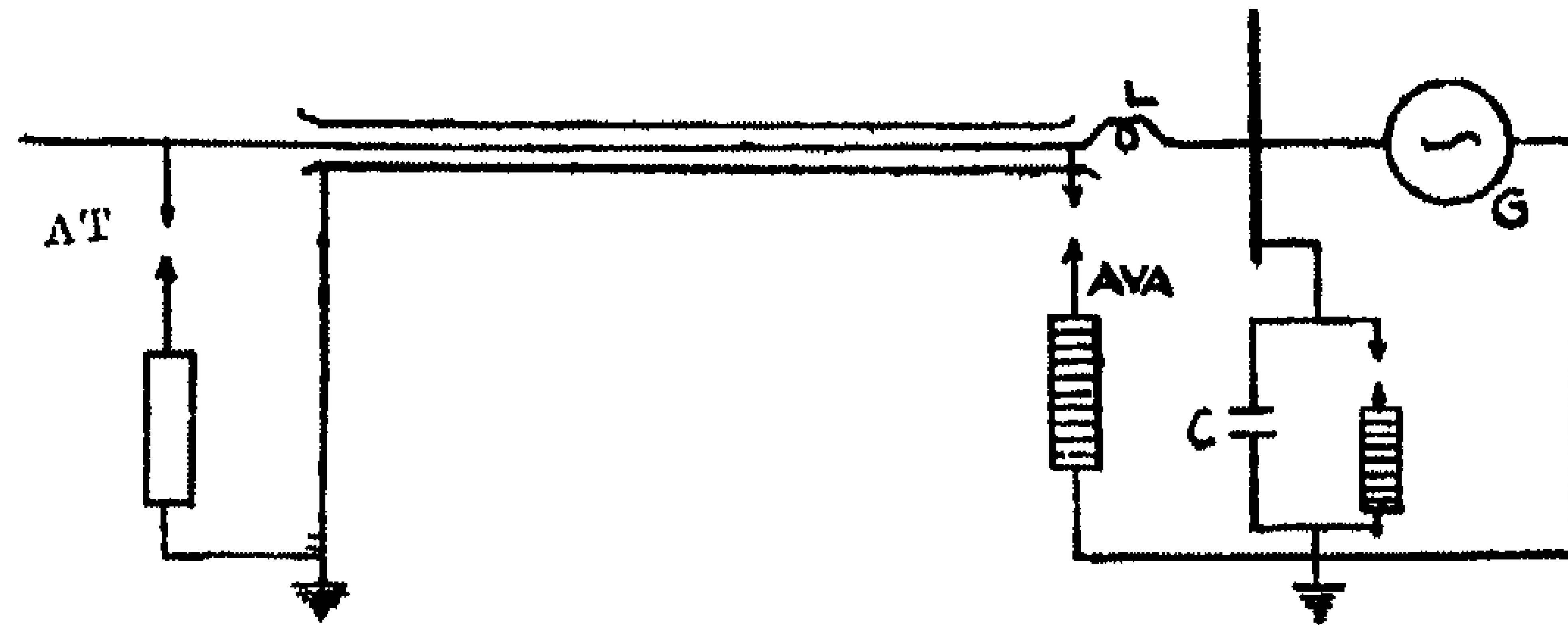
الشكل 13.30: استخدام الخواص الوقائية لطول كابل

لسوء الحظ فإن هذا الشرط لا يتحقق دائماً. مانعات أنبوب الطرد لجهد المولد لها جهود تفريغ تتعدى جهود تفريغ مانعات الصمام الآلي للمحطة. إلى جانب ذلك، فإن المانعة في نظام الشكل 13.30 مركبة على التوازي مع الكابل، الذي معاوقة تموره يمكن أن تكون في حدود Ω (20–15) وأقل. لذلك، إذا جاءت موجة حتى مع ذروة كبيرة جداً في حدود kV (500–400) من الخط الهوائي، فإنها لا تسبب تشغيل المانعة. وحيث إن معامل الانكسار عند مكان تركيبها يكون أقل من 0.1، فإن الموجة المارة من مانعة أنبوب الطرد ستسبب تشغيل مانعة الصمام الآلي عند الموصلات العمومية وبسببها فإن الموجة المنعكسة من المحطة سيكون لها قطبية سالبة، وبالتالي فإنها ستجعل مانعة أنبوب الطرد أكثر صعوبة. لذلك، حتى إذا شغلت هذه المانعة في النهاية، فإنه سيكون بعد أن يرتفع التيار خلال مانعة الصمام الآلي عند الموصلات العمومية إلى قيم كبيرة غير مسموحة.



الشكل 13.31: نظام حماية مع خانق عند بداية الكابل

ولتحسين الأنظمة الواقية، من الممكن تركيب ملفات حث [خوانق] inductors إما بين الخط الهوائي والكابل أو عند نهاية الكابل قريباً من المحطة. في الحالة الأولى [الشكل 13.31] يمكن أن يكون الخانق صغيراً [في حدود 50.1 μH]، وفي الحالة الثانية فإن قيمته يجب أن تكون أكبر. الحالة الثانية [الشكل 13.32] تقابل الأنظمة مع الخوانق المركبة لتحديد تيار دائرة–القصر. وكلاً من هذين النظامين تضمن اعتمادية عالية جداً للحماية من الصواعق للآلات الدوارة –ومع ذلك– فإنها لا تستخدم حالياً بتوسع.



الشكل 13.32: نظام حماية مع طول كابل وخانق عند نهاية الكابل

فيما يتعلق بصعوبات التزود بنظام يعتمد عليه للحماية من الصواعق للآلات الدوارة، حالياً فإن توصيل المولدات ذات مقنن 15000 kVA وأكثر إلى الخطوط الهوائية تم حظره. وفي حالة وجود ضرورة لاختيار هذا المقنن، تستخدم خطوط كابلات على جهد المولد أو توصل الآلات خلال محولات لها نسبة تحويل ratio of transformation تساوي 1:1.

١٤

الجهود الزائدة الداخلية

Internal Over-Voltages

١٤-١ تأريض التعادل في أنظمة القدرة الكهربية

Neutral Grounding in Electrical Power Systems

اختيار طريقة تأريض التعادل مرتبط أساساً مع سلوك نظام أثناء دوائر–القصر إلى الأرض وهو مشكلة معقدة، حيث إنه نتيجة لاعتبارات عدد كبير من عوامل شتى. معروف جيداً، أن الغالبية العظمى من دوائر–القصر مع الأرض على الخطوط الهوائية هي نتيجة شرر دفعي للعزل أثناء تفريغ الصواعق والتحول اللاحق للشرر الدفعي إلى تفريغ قوس. الطريقة المختارة لتأريض التعادل يجب –وقبل كل شيء– أن تضمن أكبر تصفية سريعة لقوس دائرة–القصر مع الأرض كلما أمكن بدون انقطاع الإمداد بالقدرة.

إذا كان التعادل غير مؤرض، فإن تيار سعوي، قيمته تتناسب مع السعة الإجمالية للدائرة بالنسبة للأرض، يمر خلال مكان دائرة–القصر. في دوائر السعة الصغيرة مع تعادل غير مؤرض، يكون تيار دائرة القصر مفردة الطور مساوياً لأمبيرات قليلة فقط –لذلك– فوجود دائرة–قصر في النظام عملياً لا يؤثر على شروط الإمداد للمستهلكين. وعلى الجانب الآخر، مع هذه التيارات يكون القوس غير مستقر وينطفئ آلياً بعد بعض الوقت. إذن في الأنظمة غير الكبيرة جداً، فإن الاحتفاظ بالتعادل غير مؤرض يضمن العمل العادي أثناء الأنواع الشائعة من الأعطال، أي دائرة–القصر مفردة الطور مع الأرض. ومع زيادة سعة النظام، يزداد الطول الكلي للخط أيضاً وبسببه، فإن التيار السعوي لدائرة–القصر للأرض يمكن أن يزداد إلى عشرات وحتى مئات الأمبيرات. قوس دائرة القصر عند هذه التيارات يمكن أن يتواجد لزمن طويل –وكقاعدة– تحت تأثير الرياح والانتقال الحراري للقوس، فإنه ينتشر إلى الأطوار المجاورة وتتحول دائرة–القصر

مفردة الطور إلى دائرة–قصر ثنائية أو ثلاثية الطور، والتي تقطع بواسطة حماية المرِّحلات relay protection. من الواضح، أن العمل مع تعادل غير مؤرض في هذه الظروف يكون غير مقبول. كل دائرة–قصر على الخط، مرتبطة بمرور تيارات كبيرة خلال المولدات، المحولات وقواطع الدائرة، تسبب البلي والتلف للمعدة والتقدم التدريجي في العمر الفني لها. لذلك، كلما قل معدل تكرار حدوث دوائر–القصر مع تيارات كبيرة زاد عمر معدة النظام. تيار دائرة–القصر مفردة الطور -كقاعدة- يكون أصغر من تيار القصر ثنائي الطور، وأكبر من ثلاثي الطور لكل طرق تأريض التعادل المستخدمة حالياً. إذا كان تعادل نظام كبير غير مؤرض، عملياً فإن كل دوائر القصر في النظام -كما أشرنا سابقاً- في النهاية تؤدي إلى دوائر قصر ثلاثية الطور وهي غير مسموحة على الإطلاق.

ولكي نتجنب تحول دائرة القصر مفردة الطور إلى ثلاثية الطور، تستخدم طريقتان مختلفتان لتأريض التعادل حالياً:

١. التأريض الفعال للتعادل والذي يتم بتوصيل تعادلات كل أو بعض محولات النظام بشكل مصمت أو خلال معاوقة صغيرة. الهدف الرئيسي من تأريض التعادل هو جعل تيار دائرة القصر حثي في الطور ويكفي في مقداره لتشغيل حماية المرحل. وعند حدوث ذلك فإن أي دائرة قصر مع الأرض ستسبب قطع انتقائي فوري للقطاع المعطوب. وعلى أساس القطع السريع، فإن القوس لن يحصل على زمن لينتقل إلى أطوار أخرى فقط، بل إنه أيضاً لن يسبب تدميراً محسوساً للعازل الذي نشأ على سطحه. ومن هنا فإن الخط يمكن أن يعود إلى التشغيل في الحال بعد قطعه، وهي حقيقة مستخدمة في أنظمة مختلفة لإعادة الغلق الآلي.

٢. تأريض الرنين للتعادل يتم بتوصيل مفاعلات reactors لها محاثة كبيرة [ملفات إطفاء–القوس] في تعادلات المحولات، ويعوض التيار المار خلال المفاعلات تيار دائرة–القصر السعوي إلى الأرض ونتيجة لذلك ينخفض كثيراً التيار عند مكان دائرة القصر. هذه الظروف وبالمثل بعض العوامل الأخرى تسبب سرعة إطفاء قوس دائرة–القصر مفردة الطور وتُستعاد ظروف التشغيل العادية للنظام بدون قطع القطاع المعطوب.

عند النظرة الأولى، يمكن أن نرى أن تأريض الرنين للتعادل يتميز على التأريض الفعال – ومع ذلك– فإن هذا الاستنتاج سيكون خاطئاً ومطلوب دراسة المشكلة بتفاصيل أكبر. من وجهة

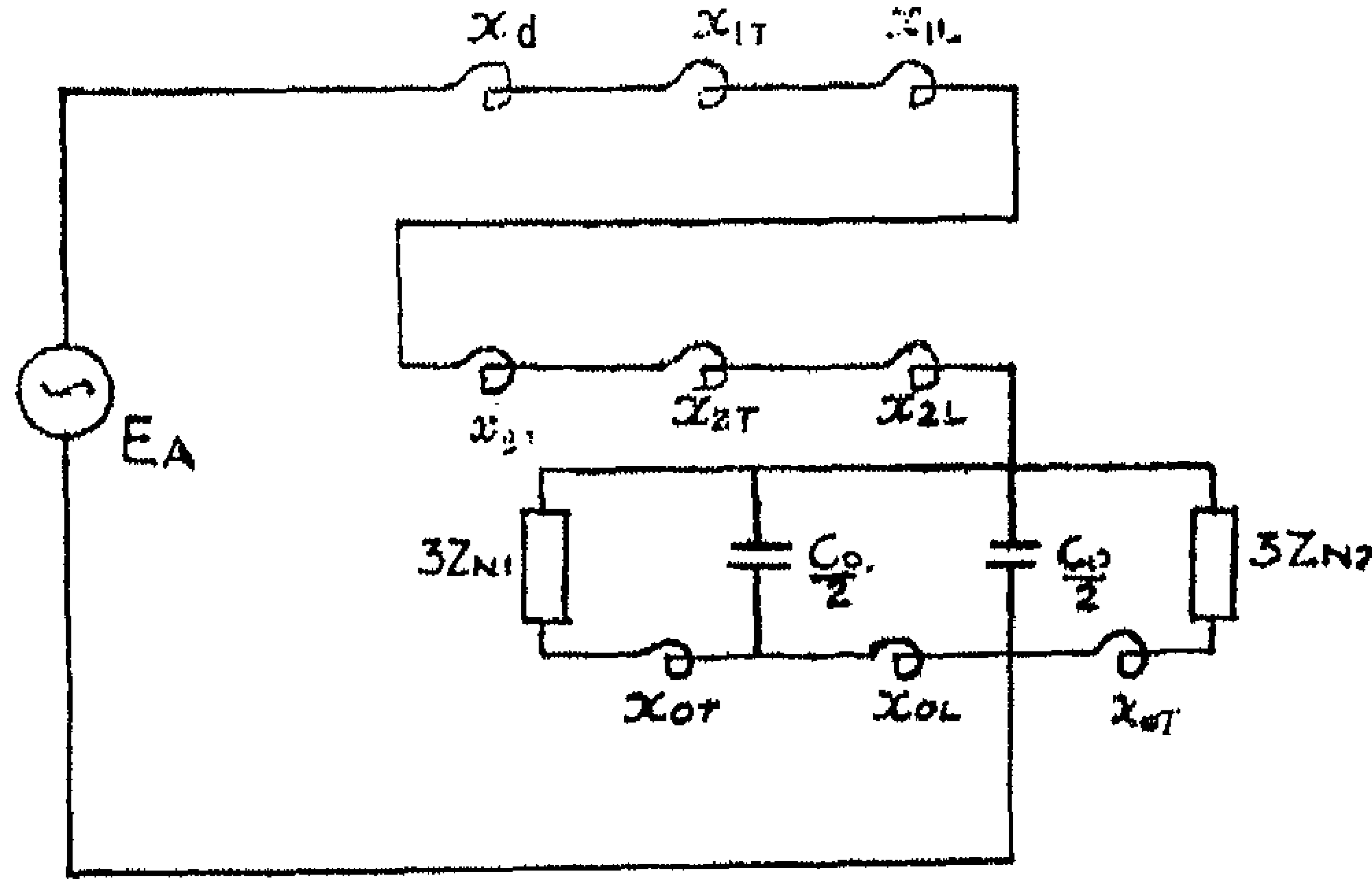
النظر هذه، سنفحص نظام بسيط ثلاثي الطور والذي فيه حدثت دائرة قصر مع الأرض لأحد الأطوار [الشكل 14.1]. وتغذى الدائرة من جانب واحد فقط وتعادلات كلا المحولين مؤرضان خلال معاوقات مختلفة Z_{N_1} ، Z_{N_2} ، وسوف نهمل تأثير الحمل أثناء تحليل نظام دائرة القصر. الخط الموضح في الشكل له سعات C_0 بالنسبة للأرض التي هي صفر. السعات بين الأطوار هي C_{AB} ، C_{AC} ، C_{BC}. من الممكن تحويل دلتا السعات إلى نجمة لها سعات غير مؤرضة –واضح– أنها تساوي $C_1 - C_0$ حيث C_1 سعة التتابع الموجبة.

الشكل 14.1: مخطط دائرة فيها عطل دائرة قصر لأحد الأطوار مع الأرض

النظام في الشكل 14.1 سنجد أن قيم الحالة المستقرة للجهود على الأطوار السليمة والتيار في الطور المعطوب والذي يمكن أن ينفذ ببساطة بمساعدة طريقة المركبات المتماثلة. حيث إننا وافقنا على ألا نعتبر تأثير الحمل، فإن شبكات التتابع الموجبة والسالبة تنكسر عند مكان دائرة–القصر ولكن كل من المحوِّلين يجب أن يدخلا شبكة تتابع الصفر، حيث إن لهما تعادلات مؤرضة خلال المعاوقات Z_{N_1} ، Z_{N_2}. قطاعات وخطوط النقل في كل شبكات التتابع يجب أن تمثل على هيئة شبكة رباعية الأطراف تتكون من محاثات موزعة [ومقاومات فعالة] وسعات أرضية. ولخط ذو طول أصغر نسبياً [أقل من 200 km]، يكون تأثير سعات الخط في شبكات التتابع الموجبة والسالبة صغيراً دائماً ومن هنا لم يؤخذا في الاعتبار في الشكل 14.1. سعات الخط في شبكة التتابع صفر بالمثل تبذل تأثيراً صغيراً إذا كانت تعادلات المحول مؤرضة خلال معاوقات صغيرة نسبياً عن المفاعلة السعوية capacitive reactance. وبطريقة أخرى فإن تأثير السعات يمكن أن يكون محسوساً –لذلك– في شبكة تتابع الصفر في الشكل 14.2 يمثل الخط على هيئة شبكة – π.

النظام النظري المستخدم لحسابات معاوقة التتابع الموجبة الإجمالية يتكون من مفاعلة متزامنة x_d للمولد، مفاعلة تسرب للمحول $x_{1_T} = x_T$ ومفاعلة الخط x_{1_L}. في شبكة التتابع

السالبة، يستبدل المولد بواسطة مفاعلة تسربه $\chi_d > \chi'_d \cong \chi_2$، ونعتبر أيضاً المحول والخط $\chi_T = x_{1_T} \cong \chi_T$، $\chi_{2_l} = \chi_{1_l}$. وهكذا، في النظام تحت الاعتبار $\chi_1 > \chi_2$ على أساس تأثير المولد.



الشكل 14.2: شبكات تتابع الموجبة، والسالبة، والصفر لدائرة الشكل 14.1

مع نظام توصيل المحولات الموضح في الشكل 14.1، فإن معاوقات تتابع الصفر لهم تكون مساوية تقريباً لمعاوقة التتابع الموجب. وإذا كان المحولان لهما نفس السعة [المقنن] فإن $\chi_{0T1} = \chi_{0T2} = \chi_{1T} = \chi_T$. وحيث إن خطوط النقل تكون مأخوذة في الاعتبار، فإن $\chi_{0l} > \chi_{1l}$، $C_0 < C_1$. في البداية، سنفحص الحالة عندما تكون معاوقة تأريض التعادلات للمحولات صغيرة ويكون ممكناً إهمال سعات الخط. في هذه الحالة ستكون معاوقة تتابع الصفر المحصلة للنظام مساوية للآتي:

$$= \frac{\left(\chi_{0l} + \chi_T + 3Z_{N_1}\right)\left(\chi_{0T} + 3Z_{N_2}\right)}{\left(\chi_{0l} + 2\chi_T + 3Z_{N_1} + 3Z_{N_2}\right)}$$

ويكون التيار مفرد الطور عند مكان دائرة القصر مساوياً للآتي:

$$I_{sc}^{(1)} = \frac{3E_A}{\chi_1 + \chi_2 + \chi_0} \qquad (1.14)$$

كذلك تيار دائرة–القصر ثلاثي الطور عند نفس نقطة الدائرة سيساوي:

$$I_{sc}^{(3)} = \frac{E_A}{x_1} \qquad (2.14)$$

حيث لتحديد التيارات في نظام الحالة المستقرة، في كلا الحالتين E_A تعني synchronous e.m.f E_d.

للبارامترات الثابتة للدائرة، تعتمد النسبة $I_{sc}^{(1)}/I_{sc}^{(3)}$ فقط على قيمة معاوقة تأريض التعادلات للمحولات، في الحالة تحت الاعتبار فإن هذه النسبة يمكن أن تكون أكبر من أو أقل من الوحدة.

التأريض الفعال للتعادل يعطي اقتصاد في العزل، لذلك فإن طريقة التأريض تستخدم عند جهود عالية عندما تشكل تكلفة العزل جزء محسوس من تكلفة معدة الجهد العالي. والآتي بعد ليس فقط مشكلة العزل ولكن عدد من العوامل الأخرى، أكثرهم أهمية معطى بأسفل، أيضاً تأثير اختيار طريقة التأريض:

١. مدى اعتمادية الإمداد مع تعادل معزول يمكن أن يتحقق في حالة تيارات دائرة–قصر صغيرة جداً فقط مع الأرض والتي تضمن الإطفاء الذاتي للقوس. مع تأريض الرنين لسعة تعادل النظام، والتي فيها نضمن اعتمادية إطفاء قوس دائرة–القصر مفردة الطور، تزداد الاعتمادية. ومع ذلك، في الأنظمة ذات السعة الكبيرة جداً، فإن تحقيق خفض أساسي في التيار عند مكان دائرة القصر يصبح صعباً جداً. في هذه الحالات، تنخفض اعتمادية التشغيل بحدة جداً حيث إن تحديد المكان والتقطع المنتقى للقطاع المعطوب بمساعدة حماية المرحل تتحقق بصعوبة كبيرة في هذه النظم. لذا فإن دائرة–القصر المفردة الطور مع الأرض والتي لا تصفى بواسطة جهاز إطفاء القوس يمكن أن تسبب تدميراً أكثر خطورة. وتنشأ صعوبات مماثلة في أنظمة الجهد العالي جداً والتي فيها أثناء دائرة–القصر مع الأرض، يتكون تفريغ كورونا شديد على الأطوار السليمة. وهذا يزيد المركبة الفعالة لتيار دائرة–القصر إلى الأرض وهذه المركبة الفعالة لا يمكن أن تُعوض بواسطة جهاز إطفاء–القوس.

شروط ضمان الاعتمادية في الأنظمة ذات التعادل المؤرض الفعال لا تعتمد عملياً على السعة والجهد الاعتباري، لذلك أحياناً، يكون نظام التعادل هذا هو الممكن الوحيد. في الأنظمة ذات التعادل المؤرض، فإن القطاع من الخط الذي تحدث فيه دائرة–القصر، يفصل في الحال بواسطة حماية المُرَّحل. ولذلك فإن إمداد القدرة لن يُقطع أثناء ذلك، ويكون أساسياً إما التزود باحتياطي للدائرة [خطوط مزدوجة الدائرة، دوائر حلقية، ...إلخ] أو تزويد الخط بقواطع دائرة آلية إعادة القطع. في بعض الحالات، يصبح من

الضروري تبني كل من الإجرائين في آن واحد. لذلك، فإن ضمان العمل المعتمد عليه للنظام ذات التأريض الفعال للتعادل يكون مرتبطاً بالنفقات الإضافية، والتي تُحدد بالاعتبارات الاقتصادية.

٢. ينتج كل خط تيار متردد، مجال مغنطيسي متغير الزمن في الفراغ المحيط به يستحث جهد في الكنتورات المعدنية المجاورة. هذا الكنتور يمكن أن يكون خط اتصالات مقام إلى جوار خط القدرة. الجهود المستحثة في خطوط الاتصالات يمكن أن تنتج ضوضاء خطيرة ويمكن أن تكون خطيرة على الأشخاص العاملين على الخط. إذن فإن حماية خطوط الاتصالات من التداخل والتأثيرات الخطيرة لخط القدرة تكوِّن مشكلة خطيرة.

أثناء العمل العادي للخطوط ثلاثية الطور المتماثلة، تكون التيارات والجهود في كل الأطوار متساوية في المقدار ومزاحة عن بعضها بـ °120، لذلك فإن شدة المجالات الكهربية والمغنطيسية الناتجة بواسطة طور منفصل من الخط عند أي نقطة تعوض [تعادل] بعضها البعض وتكون التأثيرات على خطوط الاتصالات غائبة عملياً. أثناء دائرة القصر مفردة الطور إلى الأرض تظهر مركبات تتابع الطور صفر للجهد والتيار والتي تكون متماثلة في كل الأطوار وتكون حقيقة مصدر الضوضاء. مع تعادل معزول، تكون تيارات تتابع الطور صفر صغيرة وبالتالي يكون التأثير الكهروستاتيكي ذات أهمية كبيرة والذي يمكن الحد منه بوسائل بسيطة نسبياً. مع تعادل مؤرض –على العكس– يكون التأثير الكهرومغنطيسي ذات أهمية كبيرة والذي يخلق بواسطة المجال المغنطيسي لتيارات تتابع الطور صفر ويكون التعامل معه أكثر صعوبة. من هنا فإن مشكلة حماية خطوط الاتصالات عندما يكون تعادل نظام القدرة مؤرض تأريضاً فعالاً تُحل بأسلوب أكثر تعقيداً.

نظام تأريض الرنين له أيضاً عيوب محددة في هذا الشأن. حتى إذا وجد تماثل صغير بين سعات الأطوار المنفصلة بالنسبة للأرض. تحدث إزاحة محسوسة لتعادل النظام، أي يوجد جهد تتابع صفر حتى تحت نظام العمل العادي. بالرغم من أن هذه الجهود تكون أقل من تلك التي أثناء دوائر–القصر مفردة الطور، فإنها تتواجد باستمرار وبسببها فإن تأثيرها على خطوط الاتصالات يجب أن تمنع بالمثل بقدر ما يمكن.

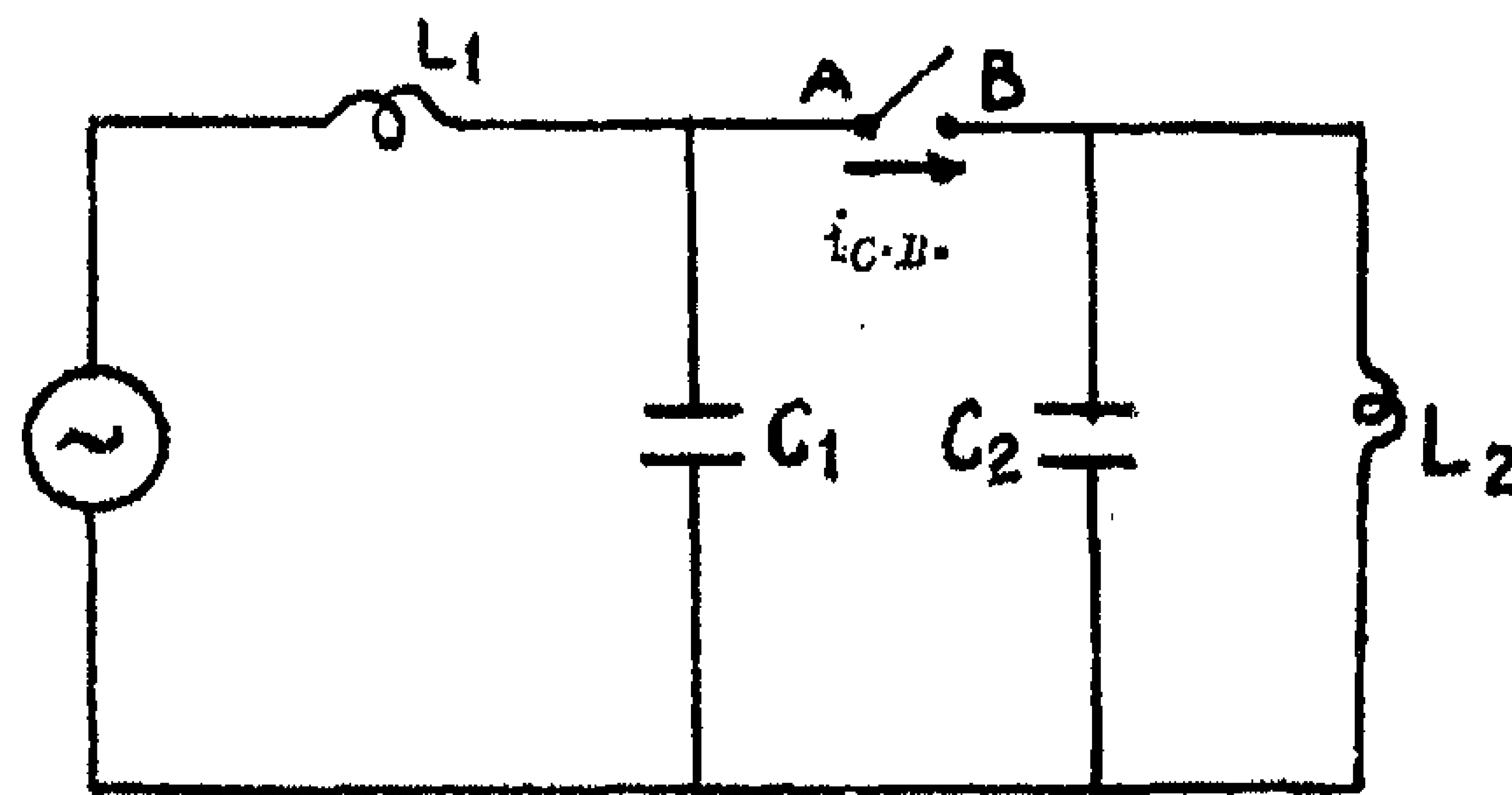
٣. حماية المرِّحلات لكل أنواع دوائر–القصر، شاملة دوائر–القصر مفردة الطور في النظام ذات التعادل المؤرض، يمكن أن يزود مع اعتمادية كافية بمساعدة أنظمة بسيطة

نسبياً. في الأنظمة ذات التعادل المعزول، أو تعادل مؤرض بالرنين، فإن حقيقة تأريض الأطوار تتم بسهولة. من الصعب جداً تحديد مكان التأريض. ويمكن أن يبدو أن تحديد مكان دائرة–القصر في هذه الأنظمة ليس أساسي، حيث إن القوس يجب أن يُطفأ بنفسه. ومع ذلك، بالإضافة إلى دوائر–القصر على هيئة قوس، فإنه نادراً ما يحدث أيضاً تأريض معدني والذي لا يمنع بواسطة جهاز إطفاء القوس. إلى جانب ذلك –كما سبق الإشارة– فإن احتمال الإطفاء الذاتي للقوس ينخفض مع الزيادة في سعة النظام. في هذه الحالات، يكون الانقطاع السريع للقطاع المعطوب أساسياً. ويجب معرفة أن صعوبات تحديد مكان دائرة القصر للأرض –خاصة في الدوائر المتفرعة– تكون عوائق خطيرة لاستخدام تأريض رنين التعادل.

من الاعتبارات السابقة، نرى أن كل طريقة من طرق تأريض التعادل لها مميزات وعيوب خاصة بها. ويكون تقديرها دائماً صفة إدراكية تحدد بالتقاليد المتبعة في الدولة، لذلك ففي الدول المختلفة في العالم وفي أوقات مختلفة تُستخدم طرق مختلفة لتأريض التعادل. في أوربا حيث ولدت فكرة تأريض رنين التعادل أعطى التفضيل لطريقة التأريض هذه والتي تستخدم للجهود الأعلى. في اليابان ودول أخرى استخدم تأريض الرنيْن حتى 220 kV . في U.S.A – على العكس– استخدمت الأنظمة التأريض الفعال للتعادل على نطاق واسع واستخدم التأريض الفعال حتى في شبكات التوزيع kV (35–10). في الاتحاد السوفيتي فإن هاتان الطريقتان لتأريض التعادل كانتا مستخدمتان منذ زمن وكل منهما في نطاق الجهود الاعتبارية له. عملياً فإن كل أنظمة الاتحاد السوفيتي –باستثناء حالات خاصة قليلة [مثلاً المناطق المغطاة دائماً بالثلوج، حيث بسبب أنواع التربة غير المفضلة، يمكن تنفيذ التأريض الصلب للتعادل] من 110 kV وما فوقها، تعمل مع تأريض تعادل فعال. أنظمة 35 kV وما دون تعمل مع تأريض رنين للتعادل أو مع تعادل معزول، إذا كان تيار دائرة القصر للأرض صغيراً جداً. وحديثاً فإن تعادلات المولدات تؤرض أيضاً من خلال جهاز إطفاء–القوس مع نظره لتخفيض التيار عند مكان دائرة القصر إلى الأرض و–هكذا– ينخفض تدمير المولدات بدوائر–القصر هذه. من المثير أن نلاحظ حديثاً أن الميل لتقسيم كرة التأثير لطريقتين لتأريض التعادل قد بدأت تُخترق في دول أخرى من العالم أيضاً. في U.S.A. بدأ تأريض دوائر الجهد المنخفض خلال جهاز إطفاء–القوس وفي أوربا –على العكس– بدأ تدريجياً تبني التأريض الفعال للتعادل لأنظمة الجهد الاعتباري الأعلى.

١٤-٢ الجهود الزائدة أثناء فتح المحاثات Over-Voltages During the Opening of Inductances

دراسة الجهود الزائدة أثناء فتح المحاثات يمكن أن يتم على أساس الدائرة المكافئة البسيطة في الشكل 14.3 والتي فيها يمثل L_1 ، C_1 محاثة وسعة المصدر، المحاثة L_2 هي التي ستفتح [مثلاً، محول على اللاحمل]، C_2 السعة الذاتية لملف الحث. إلى جانب هذه البارامترات الأساسية الأربعة للدائرة، تعتمد قيمة الجهود الزائدة الناتجة فيها إلى حد كبير على عملية تقطع تيار القوس في قاطع الدائرة.

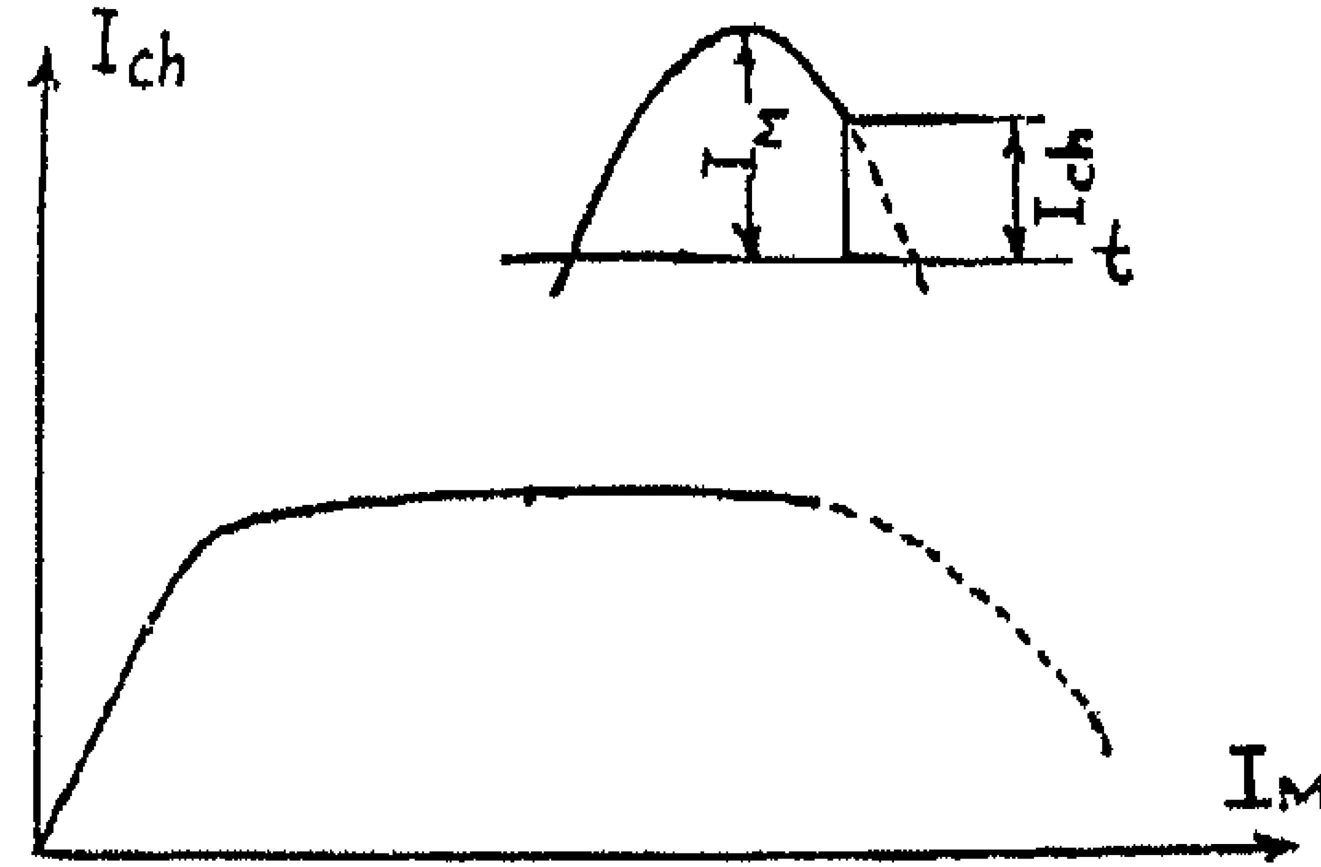


الشكل 14.3: مخطط لتحليل الجهود الزائدة أثناء فتح المحاثات. L_2 المحاثة التي ستفتح

عند تيارات كبيرة [مثلاً، أثناء فتح أحمال حثية كبيرة أو دوائر قصر] يحدث العزل النهائي للدائرة دائماً عند لحظة مرور التيار خلال الصفر، تخفيض التيار إلى الصفر يحدث بنعومة. لذلك، عند لحظة عزل الدائرة –عملياً– لا توجد طاقة مغنطيسية في المحاثة L_2 ولا تكون عملية القطع مصحوبة بارتفاع مفاجئ للجهود على قاطع الدائرة.

عند تيارات صغيرة [مثلاً، أثناء فتح محولات غير محملة] تكون درجة تأين القوس غير مأخوذة في الاعتبار وتحت فعل دفع قاطع الدائرة، فإن تحلل سريع جداً لعمود القوس –حتى قبل أن يمر التيار خلال قيمة الصفر العادية له– يمكن أن يحدث. أثناء ذلك، تزداد مقاومة القوس فجأة وينخفض التيار في القوس فجأة إلى الصفر. ويحدث ما يسمى بـ"شطر التيار" وهو السبب الرئيسي للجهود الزائدة. القيمة اللحظية للتيار –والذي يمكن أن يشطر– تعتمد على درجة تأين القوس عند هذه اللحظة من الزمن وإمكانيات إطفاء القوس لقاطع الدائرة. واعتماداً على ذروة I_M amplitude للتيار خلال قاطع الدائرة، فإن قيمة تيار الشطر I_{ch} current of chopping تتغير تقريباً حسب الأسلوب الموضح في الشكل 14.4. عند تيارات صغيرة جداً، يمكن أن يحدث الشطر على الذروة، من هنا فإن I_{ch} تزداد بالتناسب مع I_M.

وبعد أن يصبح التيار I_M مساوياً لأقصى تيار ممكن للشطر لقاطع الدائرة المعطى، فإن قيمة I_{ch} تمتنع عملياً عن التغير وتنتقل لحظة الشطر تدريجياً في اتجاه لحظة مرور التيار خلال الصفر. وفيما بعد، يبدأ تيار الشطر مرة ثانية في الانخفاض، حيث إنه لذروات كبيرة من التيارات المترددة، تزداد درجة تأين قناة القوس كثيراً جداً مما يجعل هلاكها السريع صعباً. وفي النهاية؛ عند قيم I_M الأكبر من قيمة معطاة لا تحدث ظاهرة الشطر على الإطلاق.



الشكل 14.4: الصفة التقريبية لاعتماد التيار المشطور على ذروة التيار خلال قاطع الدائرة

افترض أنه في دائرة الشكل 14.3، القيمة اللحظية لتيار الشطر كانت I_{ch} وحدثت عند اللحظة t_0 [الشكل 14.5]. وبإهمال التيارات المتفرعة في سعات الدائرة، يمكن الأخذ بأنه عند هذه اللحظة من الزمن خزنت طاقة تساوي $L_1L_{ch}^2/2$، $L_2L_{ch}^2/2$ في المحاثات L_1، L_2. وحيث إن ظاهرة الشطر تحدث عند تيارات منخفضة نسبياً فقط [أعشار من الأمبير وأقل]، فإن L_2 وهي المحاثة التي ستقطع تكون أكبر من L_1 [مرة أو مرتان]، من هنا فإن قيمة $L_1L_{ch}^2/2$ يجب أن تكون صغيرة لدرجة الإهمال ولا تستطيع التأثير على تدفق العملية. بعد تقطع التيار، يتم اصطياد طاقة تساوي $L_2L_{ch}^2/2$ في دائرة L_2C_2، مع ذبذبات تحدث في هذه الدائرة يعبر عنها بالمعادلة:

$$v_2 = V_0 \cos \omega t + \omega_2 L_2 I_{ch} \sin \omega_2 t \qquad (3.14)$$

حيث V_0= القيمة اللحظية للجهد [الجهد على السعة C_2] عند لحظة الشطر.

$\omega_2 = 1/\sqrt{L_2C_2}$ تردد التعادل لذبذبات الدائرة.

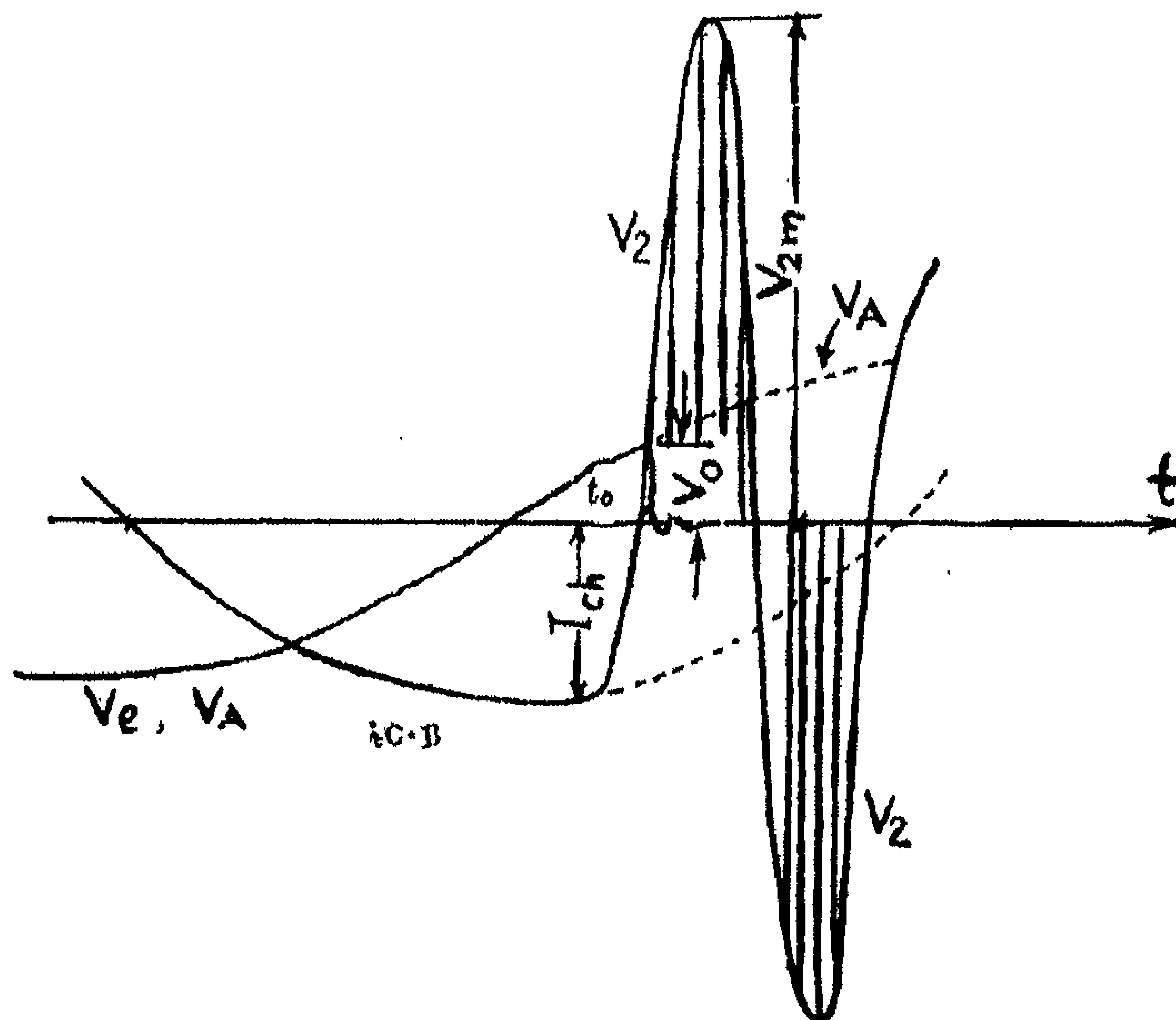
أقصى جهد على ملف المحاثة [الخانق] الذي سيقطع، حسب المعادلة (14.3) يساوي:

$$V_{2_{max}} = \sqrt{V_0^2 + \omega_2^2 L_2^2 I_{ch}^2} = \sqrt{V_0^2 + \frac{L_2}{C_2} I_{ch}^2} \qquad (4.14)$$

عنذ لحظة أقصى جهد، يمر التيار في دائرة التذبذب خلال الصفر، ومن السهل إيجاد قيمة $V_{2_{max}}$ على أساس توازن الطاقة أيضاً:

$$\frac{V_0^2 C_2}{2}+\frac{I_{ch}^2 L_2}{2}=\frac{V_{2_{max}} C_2}{2} \tag{5.14}$$

حيث إن الطاقة الكلية التي بدأت في المحاثة L_2 والسعة C_2 عند لحظة الشطر قد كتبت على الجانب الأيسر. عند لحظة أقصى جهد، فإن كل هذه الطاقة تتحول إلى طاقة كهربية $V_{2_{max}}^2 C_2/2$.



الشكل 14.5: نمو الجهود الزائدة بدون اعتبار الضرب المتكرر للقوس في قاطع الدائرة عندما يكون الخانق مفتوحاً. الجهد بين تلامسات قاطع الدائرة مظلل

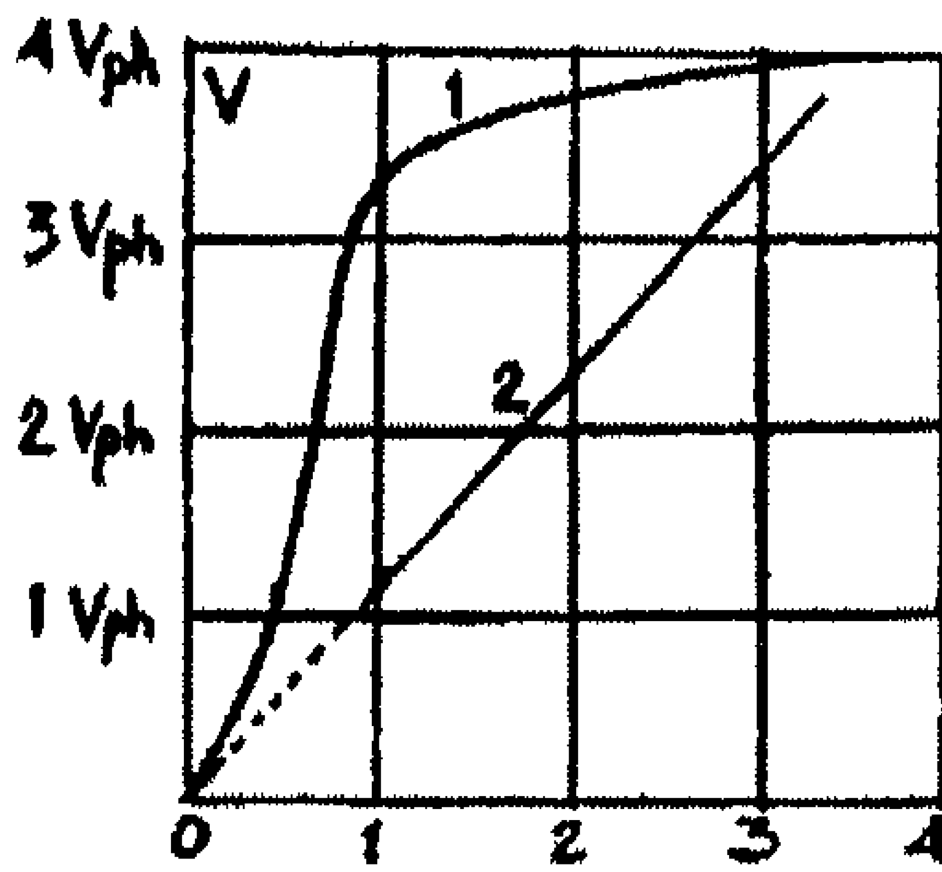
ولتقدير القيمة الممكنة لـ $V_{2_{max}}$ سنفحص فتح محول له مقنن $P_N = 31500\ \text{kVA}$ وجهد اعتباري [اسمى] $121\ \text{kV}$. مثل هذا المحول له تيار عدم حمل $i_{N.L}\% \cong 3\%$ ، من هنا فإن ذروة التيار هي $I_N = i_{N.L}\% P_N \times \sqrt{2}/100\sqrt{3}V_N \cong 6.4\ \Omega$. المحاثة لكل طور من المحول $L_2 = V_N \sqrt{2}/\sqrt{3} I_M = 50\ \text{H}$. إذا أخذت سعة اللفات لتكون في حدود $10{,}1000\ \text{pF} = 10^{-8}\ \text{F}$ ، التردد الطبيعي للدائرة $\omega_2 = 1/\sqrt{50\times10^{-8}} = 1420\ \text{c/s}$ ، أي أكبر بحوالي 4.5 مرة من تردد الدائرة. في قواطع الدائرة الحديثة يمكن أن تصل تيارات الشطر إلى

قيمة في حدود 10 A، ومن هنا في الحالة تحت الاعتبار، لا يمكن أن يكسر تيار عدم حمل عند الأقصى، لذلك $I_{ch} = I_M = 6.4$ A. وهكذا، فإن ذروة الحد الثاني في المعادلة (14.3) يمكن أن تصل إلى قيمة $\omega_2 L_2 I_{ch} = 1420\times50\times6.4 = 450$ kV أي 4.5 مرة من ذروة جهد طور المحول.

إذا اعتبرنا أنه أثناء الحسابات أخذنا قيمة زائدة من السعة الذاتية للفات، فإن إمكانية الحصول على جهود زائدة كبير جداً أثناء فتح المحولات غير محملة تكون واضحة. ومع ذلك، فإن قيمة الجهد الزائد المتحصل عليها فيما سبق يكون ما يسمى بـ"القيمة المتوقعة" للجهد والذي لا نصل إليه أحياناً في المحولات الحقيقية بسبب الانهيارات المتكررة بين تلامسات قاطع الدائرة. الجهد V_{AB} بين تلامسات قاطع الدائرة يُحدد بواسطة فرق الجهود V_A، V_2. وحيث إنه عند لحظة قطع التيار تُخزن بالمثل طاقة محددة في المحاثة، فإن ذبذبات مشابهة لتلك المدروسة سابقاً تنشأ في الدائرة C_1، L_1 أيضاً. ومع ذلك، فعلى أساس القيمة الصغيرة لهذه الطاقة والقيمة الكبيرة نسبياً للسعة C_1، تكون ذروة هذه الذبذبات ليست كبيرة. لذلك، فإن الجهد عند النقطة A يمكن أن يؤخذ مساوياً تقريباً لجهد المصدر. في هذه الحالة يتغير الجهد بين تلامسات قاطع-الدائرة بالأسلوب الموضح في الشكل 14.5 بالتظليل، أي أن أول أقصى قيمة للجهد V_{AB} يكون أقل من الجهد V_2 بواسطة القيمة اللحظية لجهد المصدر وتكون القيمة القصوى الثانية أكبر بنفس الكمية -لذلك- يزداد الجهد بين تلامسات قاطع-الدائرة بسرعة كبيرة من صفر حتى قيمة تتعدى الجهد الاسمي [الاعتباري] ويكون إعادة ضرب القوس المتكرر في قاطع الدائرة غير قابل للتجنب.

بعد قطع التيار في قاطع-الدائرة، تزداد متانة العزل الكهربي للفراغ بين التلامسات كما هو مبين في الشكل 14.6، بسبب فصل التلامسات. قواطع-الدائرة الهوائية مع الحركة السريعة لتلامساتها يكون لها في البداية نمو أكبر سرعة لمتانة العزل مقارنة بقواطع-الدائرة بالزيت، المتانة القصوى بين تلامسات كل من طرازي قواطع-الدائرة متماثلة عملياً، حيث إنها تحدد بالمواصفات القياسية. القيم في الشكل 14.6 هي لقواطع-دائرة 110 kV والتي فيها تكون المتانة القصوى قريبة من $4V_{ph}$. ويجب ملاحظة أن منحنيات الشكل 14.6 تقريبية جداً وتميز فقط الحد العلوي لمتانة العزل بين التلامسات. وتوضح تجارب تحديد المتانة المستعادة لقواطع-الدائرة تشتتاً كبيراً في الكميات والتي -بعيداً عن الصفة الإحصائية للتشتت المعروفة لدينا-

تحدد بواسطة التشتت في سرعة فصل التلامسات، شدة الدفع، وأيضاً بواسطة طور التيار عند لحظة فصل التلامسات. من هنا فإن جهد الشرر الفعلي يكون دائماً أقل من ذلك المبين في الشكل 14.6.

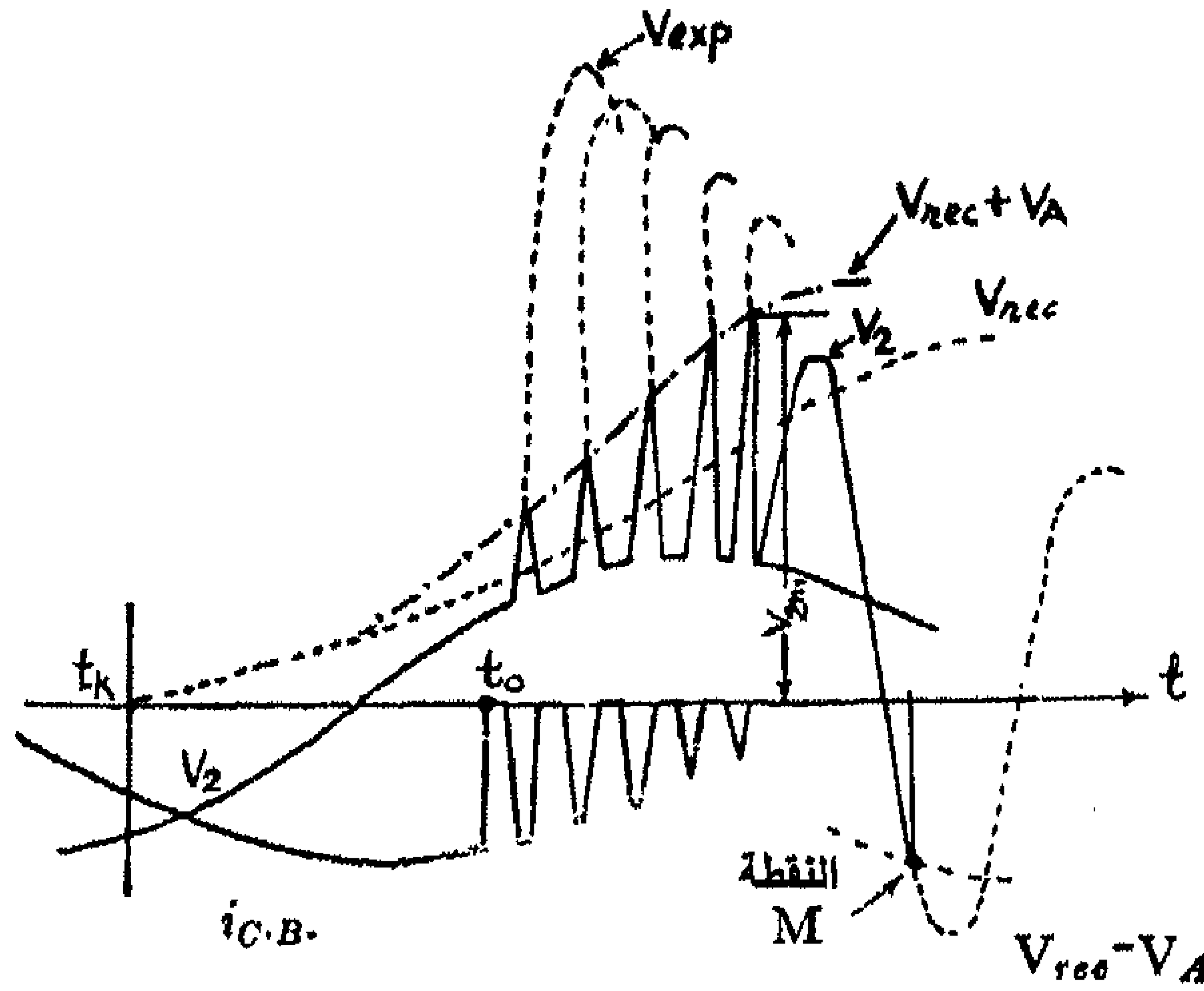


الشكل 14.6: نمو متانة العزل بين تلامسات قاطع-الدائرة. (1) قاطع دائرة-هواء؛ (2) قاطع دائرة-زيت

من الممكن توضيح عملية القطع [الانهيار] المتكررة بين تلامسات قاطع-الدائرة بيانياً بمساعدة الشكل 14.7. أولاً يبدأ شطر التيار -كما سبق- عند اللحظة t_0، وبعدها يبدأ الجهد في الزيادة من خلال المنحنى المعطى بالمعادلة (14.3). تبدأ تلامسات قاطع-الدائرة في الفصل عند اللحظة t_k، أي مبكراً عن شطر التيار. وإذا كان القوس قد انطفأ عند اللحظة t_k، فإن المتانة المستعادة لقاطع-الدائرة تتغير بالأسلوب الموضح بالمنحنى V_{res}. وفعلياً حتى اللحظة t_0 -وحتى استمرار وجود القوس في قاطع-الدائرة- تكون المتانة الفعلية للثغرة بين التلامسات مساوية للصفر. ولكن عند لحظة الشطر، وعلى أساس التحلل السريع لعمود القوس، تزداد متانة الثغرة بسرعة جداً حتى قيمة تحدد بالمنحنى V_{res}. وكتقريب أول، دعنا نأخذ هذه الزيادة لتكون لحظية. القطع التالي بين التلامسات سيحدث عند تلك اللحظة من الزمن عندما يتقاطع منحنى الجهد على قاطع-الدائرة مع منحنى V_{res}، وبعد ذلك فإن الجهد بين تلامسات قاطع-الدائرة سيخفض عملياً إلى الصفر، والجهد V_2 حتى قيمة جهد المصدر. الجهد بين تلامسات قاطع-الدائرة غير موضح في الشكل 14.7. ولكن ليس من الصعب تحديد لحظة القطع باعتبار الشكل 14.5 حيث أثناء سياق نصف الدورة الأولى، تكون ذبذبات الجهد V_{AB} أقل من تلك الخاصة بـ V_2 بكمية تساوي القيمة اللحظية لجهد المصدر. إذن لحظة القطع يمكن أن تُحدد كنقطة تقاطع منحنى $V_{res}+V_A$ مع منحنى الجهد المتوقع V_{ex} على المحاثة التي ستفتح.

عند لحظة القطع، يعود ظهور التيار $i_{C.B}$ بين التلامسات. ويزداد هذا التيار بسرعة جداً وبعده يحدث شطر جديد للتيار، ولكن الآن عند قيمة لحظية أصفر إلى حد ما من التيار. وعلى ذلك، فإن ذروة القيمة المتوقعة أيضاً تصبح أقل. ومع ذلك، حيث إنها تتعدى القيمة $V_{res}+V_A$، فإن قطعاً جديداً للثغرة بين التلامسات يحدث، وتتكرر العملية حتى ينخفض

تدريجياً الحد الأقصى من جهد الاستعادة بين تلامسات قاطع-الدائرة ولا يصبح أصغر من المتانة المستعادة. وغالباً ما يحدث هذا قريباً من لحظة المرور العادي للتيار الجيبي خلال الصفر.

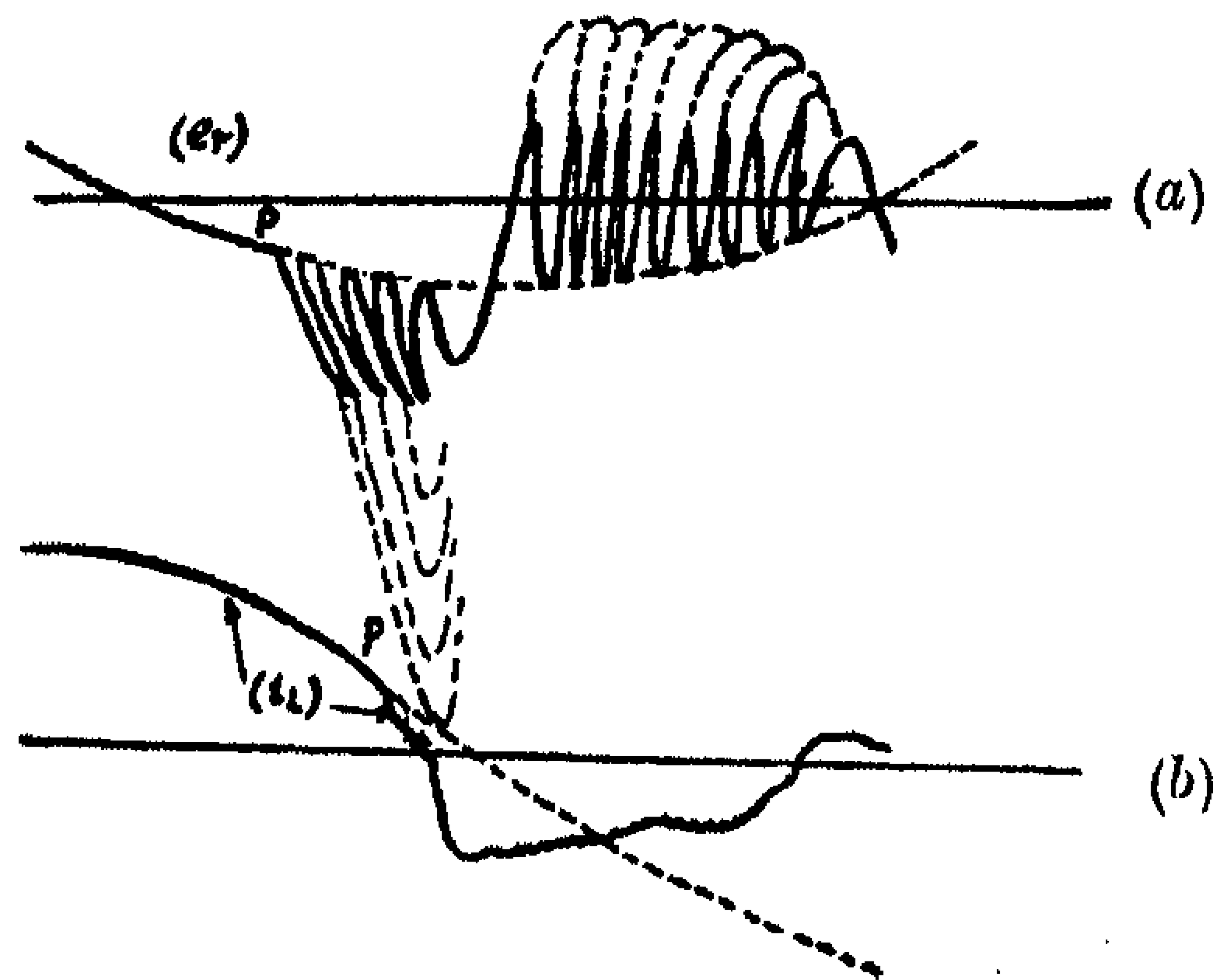


الشكل 14.7: تمثيل بياني لتكوين الأقواس المتكررة في قاطع-دائرة

يمر الجهد V_2 خلال الصفر وتبدأ نصف الفترة الثانية من الذبذبات الطبيعية. ولكن كما نرى من الشكل 14.5، أثناء نصف الفترة الثانية يكون الجهد بين تلامسات قاطع-الدائرة أكبر من V_2 بكمية تساوي القيمة اللحظية لجهد المصدر. لذلك، يكون إشعال القوس مرة أخرى ممكناً إذا كان منحنى $V_{res}-V_A$ يتقاطع مع منحنى V_2. ويحدث هذا التقاطع في الشكل 14.7 عند النقطة M، وبعدها يمكن أن تستمر عملية إعادة إشعال القوس في قاطع الدائرة. تغير الجهد خلال ذلك، موضح في الشكل 14.8، حيث في مكان التيار في قاطع الدائرة موضح التيار في المحاثة التي تفتح. هذا التيار -طبيعياً- لا ينخفض إلى الصفر عند لحظات الشطر، حيث إنه يبدأ التدفق خلال السعة C_2، وهكذا يسبب زيادة في الجهد V_2.

إعادة الضرب [الإشعال] المتكررة للقوس في قاطع-الدائرة يمكن أن يتوقف بسرعة ولكنه يمكن أيضاً أن يستمر حتى لعدد قليل في أنصاف الفترات. هذا الاستمرار في وجود إعادة الإشعال [الضرب] يعتمد على قيمة الجهد المتوقع، شدة خمود الذبذبات الطبيعية ومعدل زيادة متانة عزل قاطع-الدائرة. إذا كان الجهد المتوقع ليس كبيراً، فإن ذروته تصبح أقل من $V_{res}+V_A$ بعد عدد صغير من إعادة الإشعال، وبعده يحدث القطع النهائي للدائرة. لتخميد محسوس للذبذبات الطبيعية، يكون الحد الأقصى الثاني للجهد أقل من الأول، ومن هنا

ينخفض احتمال إعادة الإشعال عند النقطة M. ونرى من الشكل 14.7 أنه كلما طالت عملية إعادة الإشعال المتكررة لمنحنى معطى من المتانة المستعادة، كبرت القيمة التي يصل إليها الجهد V_2. وبالتالي فإن تخفيض V_{ex} وزيادة الخمد يعملان على إنجاح تخفيض الجهود الزائدة.

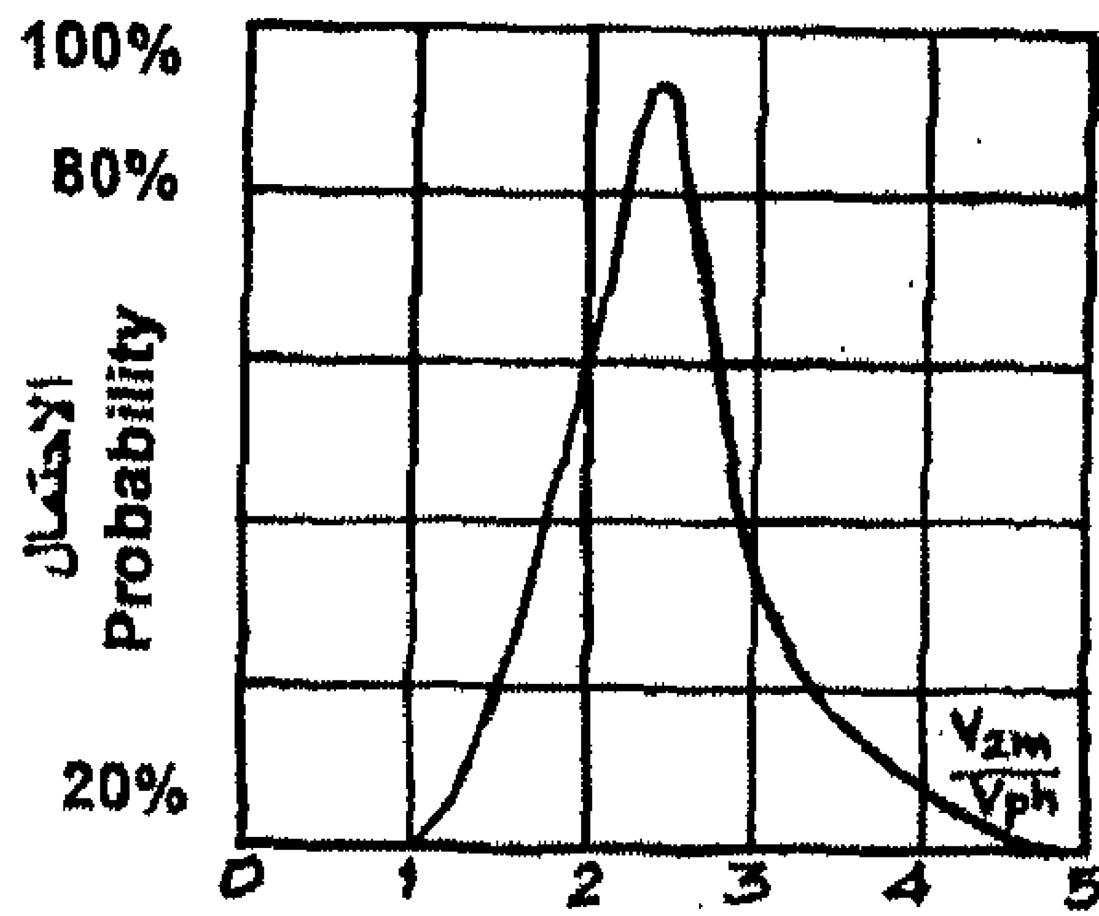


الشكل 14.8: تقطع التيار الحثي لـ $I = 5$ A عند جهد 15 kV بواسطة قاطع دائرة بالزيت. (a) أوسليجرام التيار؛ (b) أوسليجرام الجهد على المحاثة

زمن استمرار وجود إعادة الإشعال المتكرر ينخفض أيضاً مع الزيادة في معدل استعادة متانة العزل الكهربي –ومع ذلك– ليس من الصعب أن نرى أن كميات الجهود–الزائدة تزداد أثناء ذلك.

الأسباب المعطاة سابقاً تصف صورة نمو الجهود–الزائدة أثناء فتح المحاثة بشكل تقريبي جداً. وتصبح العملية معقدة بواسطة ذبذبة الجهد في الكنتور L_1C_1 من جانب المصدر، الصفة غير الخطية لمنحنى التمغنط للمحاثة المقطوعة [التي بسببها تذبذبات الجهد والتيار، إلى جانب التردد الأساسي، تحتوي أيضاً توافقيات أعلى higher harmonics]، بواسطة طبيعة أكثر تعقيداً لتقطعات التيار الذي يبدأ قبل الشطر وهكذا. ومع ذلك، حتى على أساس الصورة المبسطة، من الواضح أن القيمة المحددة للجهود–الذاتية على تلامسات قاطع–الدائرة يمكن أن تكون مساوية للمتانة القصوى للثغرة بين التلامسات والجهد على المحاثة أثناء ذلك يمكن أن يكون أكبر بكمية تساوي مقدار جهد طور المصدر. وحيث إن القيمة المحددة لـ V_{res} تكون قريبة من $4V_{ph}$، الجهد–الزائد أثناء فتح المحاثة في أي حالة يجب أن لا يتعدى $5V_{ph}$

[حيث V_{ph} هي ذروة جهد الطور]. النظام الصناعي عند استخدام قاطع–دائرة ذات جهد أعلى في دائرة جهد معطى تكون استثناءً. في هذه الحالة ستكون القيمة المحددة لـ V_{res} أكبر من $4V_{ph}$ مقارنة مع الجهد الاسمي للدائرة والتي بسببها يمكن أن تكون الجهود–الزائدة، كبيرة جداً أيضاً.



الشكل 14.9: احتمال الجهود–الزائدة في حالة فتح محول غير محمل ذو سعة 20 MVA بواسطة قاطع–دائرة

من الطبيعي أن الجهود–الزائدة $5V_{ph}$ يجب أن تعتبر كالحد الأعلى الممكن الوصول إليه في حالات استثنائية بسبب تراكم عدد من الظروف غير المحببة. من الضروري إجراء عدد كبير من التجارب للحصول على قيمة قريبة من هذا الحد. لذلك، تمثل عادة نتائج التجارب على هيئة منحنيات احتمال مماثلة لذلك الموضح في الشكل 14.9. بالنسبة للحالة الخاصة في الشكل 14.9 تصل الجهود–الزائدة إلى $(4.5–5)V_{ph}$ في حالات نادرة جداً فقط، القيمة الأكثر احتمالاً للجهود–الزائدة كانت في الجميع $2.2V_{ph}$.

حيث إن الجهود–الزائدة أثناء فتح المحاثات تصل إلى قيمتها النهائية في حالات نادرة جداً ولها شكل الارتفاع المفاجئ قصير الزمن، فإنها لا تمثل خطراً للعزل الذي له مستوى عزل عادي. في الحقيقة، دوام الجهود–الزائدة أثناء فتح المحاثات لا يتعدى في أي حالة 5 فترات، أي 0.1 sec. ولهذا الدوام على أساس الشكل 9.14 تكون متانة عزل المحول على الأقل أكبر بـ 1.55 ضعف من قيمة الدقيقة الواحدة. لذلك –مثلاً– عند 220 kV والتي لها جهد اختبار $V_{test} = 400$ kV، أي $3.14V_{ph}$ ستكون المتانة الفعلية للعزل للجهود–الزائدة تحت الاعتبار أكبر من $1.55 \times 3.14V_{ph} = 4.9V_{ph}$ ، أي أن تدمير هذا العزل أثناء فتح المحولات غير المحملة يكون عملياً غير ممكن. ولعزل ذات فئات منخفضة من الجهد، فإن هذا الاستنتاج يبقى أكثر تحققاً، حيث إن له نسبة متزايدة من جهود الاختبار.

ولكن يبقى عدد من المحولات في التشغيل والتي لها مستوى عزل منخفض. وعلاوة على ذلك كما أشرنا مكرراً، حالياً اتخذت إجراءات لتخفيض مستوى عزل الأنظمة الكهربية –في

المثال الأول– بالنسبة للجهد الاسمي الأعلى. لذلك، يعطى اهتمام دائماً لاكتشاف إمكانية جهود–زائدة محددة أثناء فتح المحاثات.

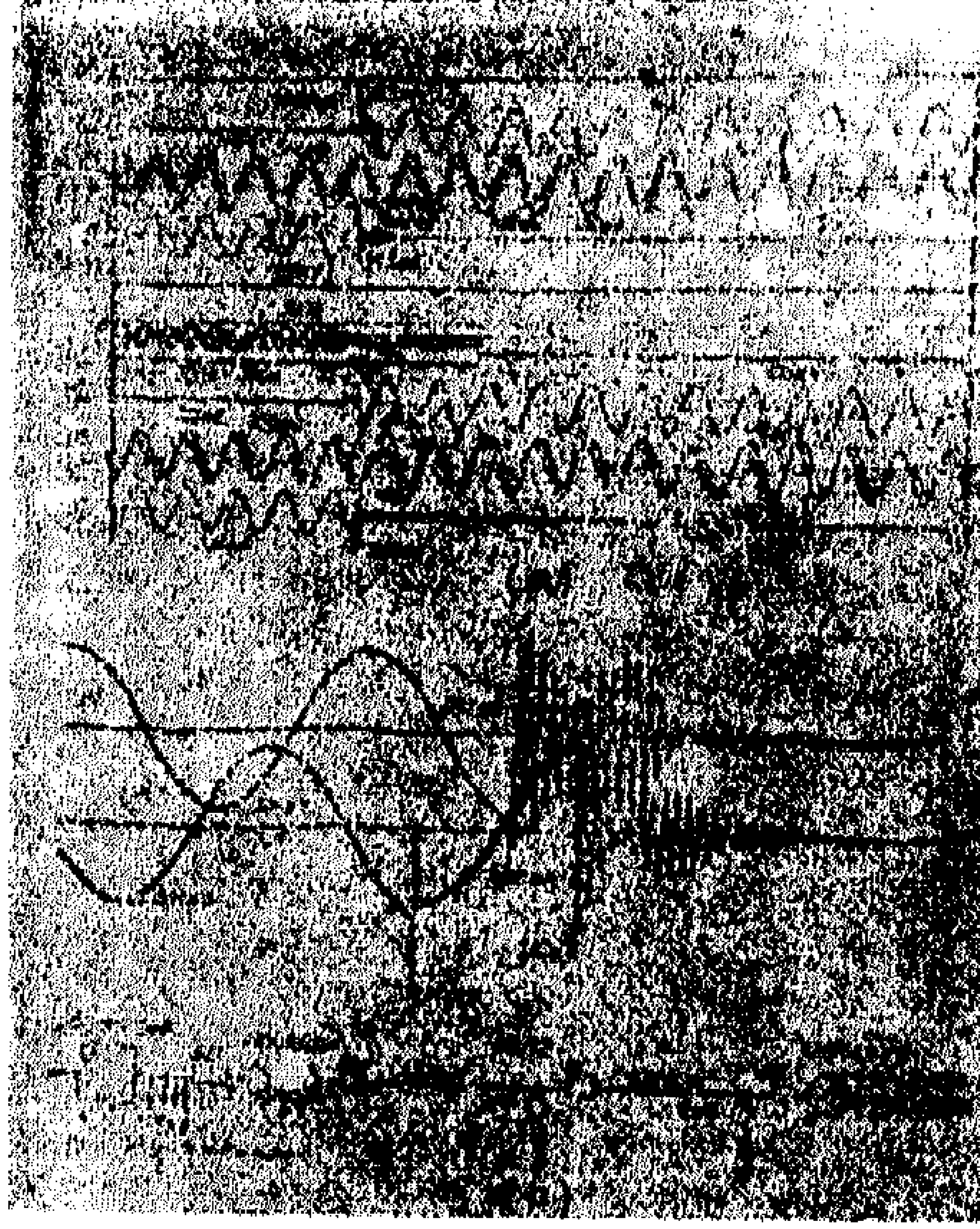
قبل كل شيء، يجب أن نلاحظ أن الجهود–الزائدة يمكن أن تنخفض بزيادة السعة C_2 الموصلة على التوازي مع المحاثة التي تفتح. فمثلاً، إذا تم توصيل قطاع من كابل 110 kV، مساحة مقطع $300\ \mathrm{mm}^2$ وطول 500 m إلى المحول الذي حسبنا له الجهد المتوقع، فإن السعة C_2 ستزداد إلى 10^{-7} F تقريباً وسينخفض الجهد المتوقع إلى 140 kV، أي أكبر من 3 مرات. مثل هذا الجهد –في الحقيقة– لا يمثل أي خطر للعزل –علاوة على– سيحدث مزيد من الانخفاض على أساس إعادة الإشعال المتكرر في قاطع الدائرة. في الوقت الراهن يتزايد استخدام الأنظمة ذات قطاعات طويلة من الكابلات الموصلة توصيلاً دائماً بالمحولات، وخاصة في محطات توليد القدرة الهيدروكهربية. وهي تكون عالية الفائدة من وجهة نظر الجهود–الزائدة أثناء فتح المحولات.

من الممكن الحصول على تقييد محسوس للجهد–الزائد باستخدام قواطع–دائرة ذات مقاومات توازي shunting، والتي من خلالها يعود جزء من الطاقة المخزنة في المحاثة إلى الدائرة. هذه المقاومات تكون مماثلة لتلك الموصى بها لتقييد الجهود–الزائدة أثناء فتح الخطوط غير المحملة –مع ذلك– فإن قيمة هذه المقاومة يجب أن تكون في حدود المفاعلة الحثية inductive reactance للدائرة التي ستفتح. في حالة المحول 121 kV، 31500 kVA الذي سبق دراسته، تكون هذه المقاومة مساوية لـ $50\times314=15000\ \Omega$، أي أكبر قليلاً من المقاومة الأساسية لفتح الخطوط غير المحملة. لذلك –من سوء الحظ– من غير الممكن حل مشكلة تقييد الجهود–الزائدة لكلا النوعين بمساعدة مقاومة واحدة فقط. وعادة ما تعطى الأفضلية إلى الخطوط غير المحملة –لذلك– لا يُنصح بتوقع تخفيض محسوس للجهود–الزائدة أثناء فتح المحولات بسبب استخدام مقاومات توازي.

أثناء دراسة خصائص استعادة متانة العزل الكهربي لقواطع–دائرة الهواء والزيت [الشكل 14.6]، يجب أن نعرف أنه نظرياً، الحدود العليا للجهود–الزائدة الممكنة في كلا الحالتين هي عملياً واحدة. ومع ذلك، بالنسبة لقواطع–الدائرة في الزيت فإن النمو الكامل للجهود–الزائدة يتطلب زمن كبير في حدود (5–4) فترات ومن هنا يكون نادراً. بالنسبة لقواطع–الدائرة بملامسات في الهواء نصل لنفس الجهد لدوام إعادة الإشعال المتكرر في أقل من فترة، ويكون احتمالها أكبر. لذلك، فإن قواطع–الدائرة سريعة الفعل والتي لها سرعة عالية في

استعادة متانة العزل الكهربي، تعطي دائماً جهود زائدة كبيرة أثناء فتح المحاثات ومن وجهة النظر هذه فإن استخدامهم لا يكون مميزاً. ومع ذلك فأثناء بناء قواطع–الدائرة، يكون أساسياً دراسة اختصاصات عملهم أثناء فتح الدوائر الحثية، وهناك اعتبارات أخرى تتطلب استخدام قواطع–دائرة لها سرعة عالية لإطفاء القوس، وبسببها يمكن بصعوبة الحد من الجهود–الزائدة أثناء فتح المحاثات بالبناء المقابل لقواطع–الدائرة.

الطريقة العملية للحد من الجهود–الزائدة هي استخدام المانعات دائمة التوصيل بأطراف المحولات. الطاقة المخزنة في محاثة المحول لا تكون كبيرة وتكون أقل من سعة حمل مانعات الطراز القياسي. فمثلاً، في محول 121 kV ، 31500 kVA عند $I_{ch} = 6.4$ A تخزن طاقة 100 J ، بينما تُبدد مانعة 110 kV طاقة أكثر برتبة واحدة بدون صعوبة. لذلك، بالنسبة لتقييد الجهود–الزائدة أثناء فتح المحولات غير المحملة، يكون من الممكن استخدام مانعات حماية من الصواعق العادية وأيضاً مانعات خاصة طراز بسيط.



الشكل 14.10: فتح مفاعل توازي سعته 40 MVAR × 3 عند نقطة التحول 2 بواسطة قاطع دائرة هواء. قدرة النقل 48 MW . (a) أوسليجرامات الجهد على المفاعل وقاطع الدائرة، التيار على المفاعل؛ (b) أوسليجرامات الجهد على الطور 1، 2 للمفاعل

وسنلاحظ أن الجهود–الزائدة تنتج ليس فقط أثناء فتح المحولات غير المحملة بل أيضاً أثناء فتح المحولات ذات الأحمال الحثية الصغيرة وبالمثل أثناء فتح المفاعلات reactors المركبة

على خطوط نقل طاقة طويلة. وكمثال في الشكل 14.10 معطى أوسليجرامات الجهود على طورين لمفاعل ثلاثي الطور مقنن عند 3×50000 kVA مركب على محطات الكهرباء الهيدروفولجا في خط لينين–موسكو. وكما نرى، أثناء أحد إطفاءات القوس، كان الجهد على المفاعل 785 kV، أي $2.3V_{ph}$. في هذه الأوسليجرامات نرى أن شطر الجهد والذبذبات الطبيعية لها تردد عالي بسبب المحاثة الصغيرة للفات المحول.

١٤-٣ الجهود الزائدة للرنين Resonance Over-Voltages

١٤-٣-١ معلومات عامة General Information

تحتوي أنظمة القدرة على عناصر عديدة قادرة على تخزين الطاقة الكهربية والمغنطيسية، سعات ومحاثات [مثلاً، سعة الخط، محاثة المحولات، ...إلخ]. ائتلاف هذه العناصر يشكل عدد كبير من الكنتورات التذبذبية، من هنا توجد احتمالات كبيرة في الأنظمة الكهربية لتولد ظاهرة الرنين. في نظام التشغيل العادي تكون هذه الكنتورات التذبذبية مفرعة بأحمال، من هنا فإن أي ذبذبات تكون غير ممكنة فيهم. ومع ذلك، فأثناء أنظمة التوصيلات المختلفة في النظام، في معظم حالات الأعطال، ينفصل جزء من كنتورات التذبذب من الحمل وتصبح الذبذبات الحرة ممكنة فيهم.

الجهود–الزائدة للرنين هي واحدة من أكثر أنواع الجهود–الزائدة تعقيداً في التحليل، حيث إن أغلب المحاثات الموجودة في الأنظمة الكهربية لها قلوب من الصلب، الخصائص المغنطيسية لها تكون غير خطية. العمليات التذبذبية في الدوائر غير الخطية تكون معقدة ومشتقة. دعنا نعتبر العمليات التي تكون مصحوبة بارتفاع الجهد على عناصر الكنتورات التذبذبية. وهذا يقصر المشكلة ويسمح باستخدام طرق تقريبية في عدد من الحالات.

يمكن تقسيم عمليات الرنين في الدوائر غير الخطية إلى أربع مجموعات:

١. رنين توافقي Harmonic Resonance

أي إنتاج ذبذبات رنين في الدائرة التي لها تردد مساوي لتردد المصدر. وأثناء ذلك، تكون الذبذبات غير نقية التوافق وتحتوي على عدد من الترددات الأعلى –ومع ذلك– تكون ذبذبات التردد الأساسي هي السائدة.

٢. رنين فوق التوافقي Super-Harmonic Resonance

حيث يحدث تكبير للذبذبات على واحد من التوافقيات الأعلى.

٣. رنين تحت التوافقي Sub-Harmonic Resonance

عندما تكون هناك ذبذبات لها تردد أصغر من تردد المصدر ممكنة في الدائرة.

٤. رنين بارامتري Parametric Resonance

ويكون إنتاجه مرتبط بالتغير الدوري لقيمة أحد بارامترات الكنتور [المحاثة أو السعة] على أساس قوى خارجية.

ومن حيث المبدأ، فإن إنتاج كل أنواع ظاهرة الرنين السابقة يكون ممكناً في أنظمة القدرة. فمثلاً، يحدث الرنين البارامتري أثناء دوائر–القصر في دائرة مولد–الهيدرو الموصل إلى خط نقل مفتوح ذات طول كبير. ذبذبات الرنين تحت–التوافقي تحدث في النقل طويل المسافة المزود بتعويض توالي ... وهكذا. ويجب أن نلاحظ أن استخدام خطوط النقل ذات الطول الكبير جداً يوسع إمكانيات إنتاج جهود–زائدة للرنين.

١٤-٣-٢ الجهود الزائدة للرنين في الدوائر الخطية Resonance Over-Voltages in Linear Circuits

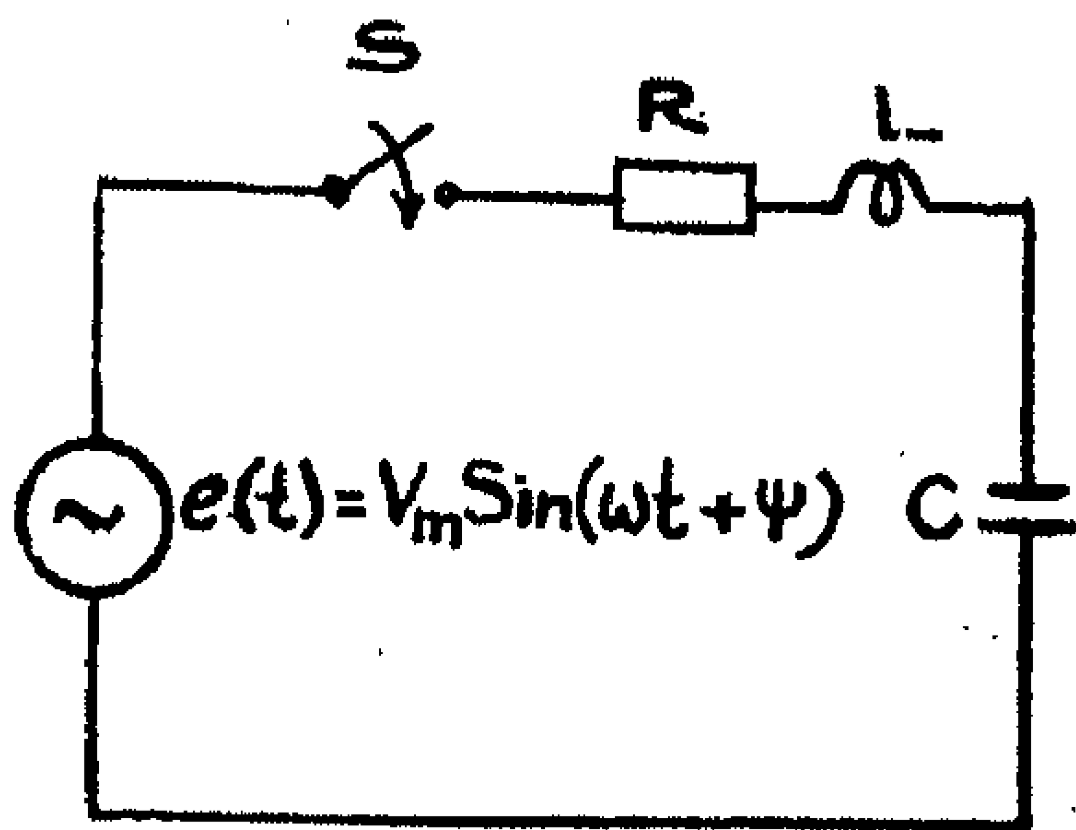
إذا اعتبرنا الكنتورات التذبذبية الأبسط –وكما هو معروف جيداً– تنتج الجهود–الزائدة أثناء الرنين في نظام توصيل توالي من السعة والمحاثة، مثلاً في نظام الشكل 14.11 والذي فيه R هي المقاومة الفعالة للملف الحثي والأسلاك الموصلة.

وسندرس توصيل هذا النظام الأبسط إلى جهد جيبي:

$$v(t) = V_M \sin(\omega t+\psi) \qquad (6.14)$$

حيث تحدد قيمة الزاوية ψ باللحظة التي يغلق عندها المفتاح S.

الجهد v_c على سعة الكنتور التذبذبي هو مجموع مركبة شرط الحالة المستقرة $V_{s.s}$ والمركبة الانتقالية V_{tran} transient component. في نظام الحالة المستقرة، يتذبذب الجهد على السعة بتردد ω للدائرة والتردد الطبيعي لتذبذب الكنتور يساوي:



الشكل 14.11: دائرة الكنتور التذبذبي الخطي الأبسط

$$\Omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

حيث

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

و

$$\delta = \frac{R}{2L} \tag{7.14}$$

في كل المشاكل العملية –التي سنتعامل معها– تكون المقاومة الفعالة R أقل كثيراً من المعاوقة المميزة للكنتور المتذبذب $\left(R << \sqrt{L/C}\right)$، لذلك $\delta^2/\omega_0^2 << 1$، $\Omega \cong \omega_0$.

في هذه الحالة فإن الجهد v_c يساوي:

$$v_c = -V_{s.s}\left[\cos(\omega t + \psi_i) - \sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\sin^2\psi_i + \cos^2\psi_i} \times e^{-\delta t}\cos(\omega_0 t + \theta)\right] \tag{8.14}$$

حيث

$$V_{s.s} = \frac{V_M}{\sqrt{\dfrac{4\delta^2\omega^2}{\omega_0^4} + \left(\dfrac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)^2}} = V_M \frac{1/\omega_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

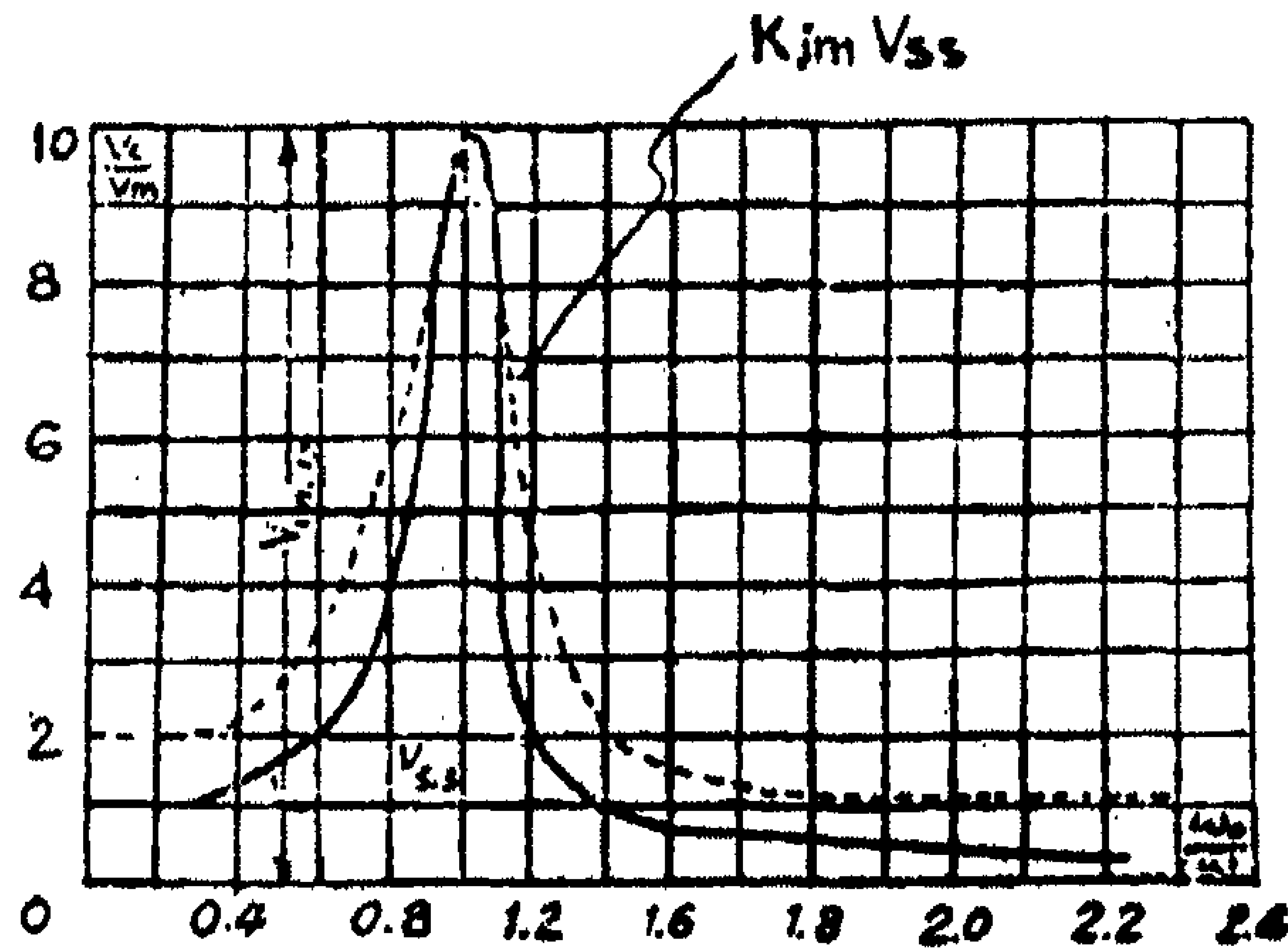
$$\psi_i = \psi - arc\tan\frac{\dfrac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1}{\dfrac{2\delta\omega}{\omega_0^2}}$$

$$\tan\theta = \frac{\omega}{\omega_0}\tan\psi_i$$

الحد الأول من هذه العلاقة يعطي جهد الحالة المستقرة على المكثف والثاني يعطي الجهد العابر. ويبين الشكل 14.12 اعتماد جهد الحالة المستقرة على النسبة ω/ω_0 بواسطة خط مستمر لحالة خاصة وهي $\delta/\omega_0 = 0.05$. وتقابل أقصى قيمة من هذا المنحنى توليف النظام المضبوط في الرنين عندما $\omega = \omega_0$. قيمة أقصى قيمة تساوي:

$$\frac{V_{C_{max}}}{V_M} = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \tag{9.14}$$

أي أنه يُحدد بنسبة المعاوقة المميزة لكنتور التذبذب إلى المقاومة الفعالة R للدائرة.



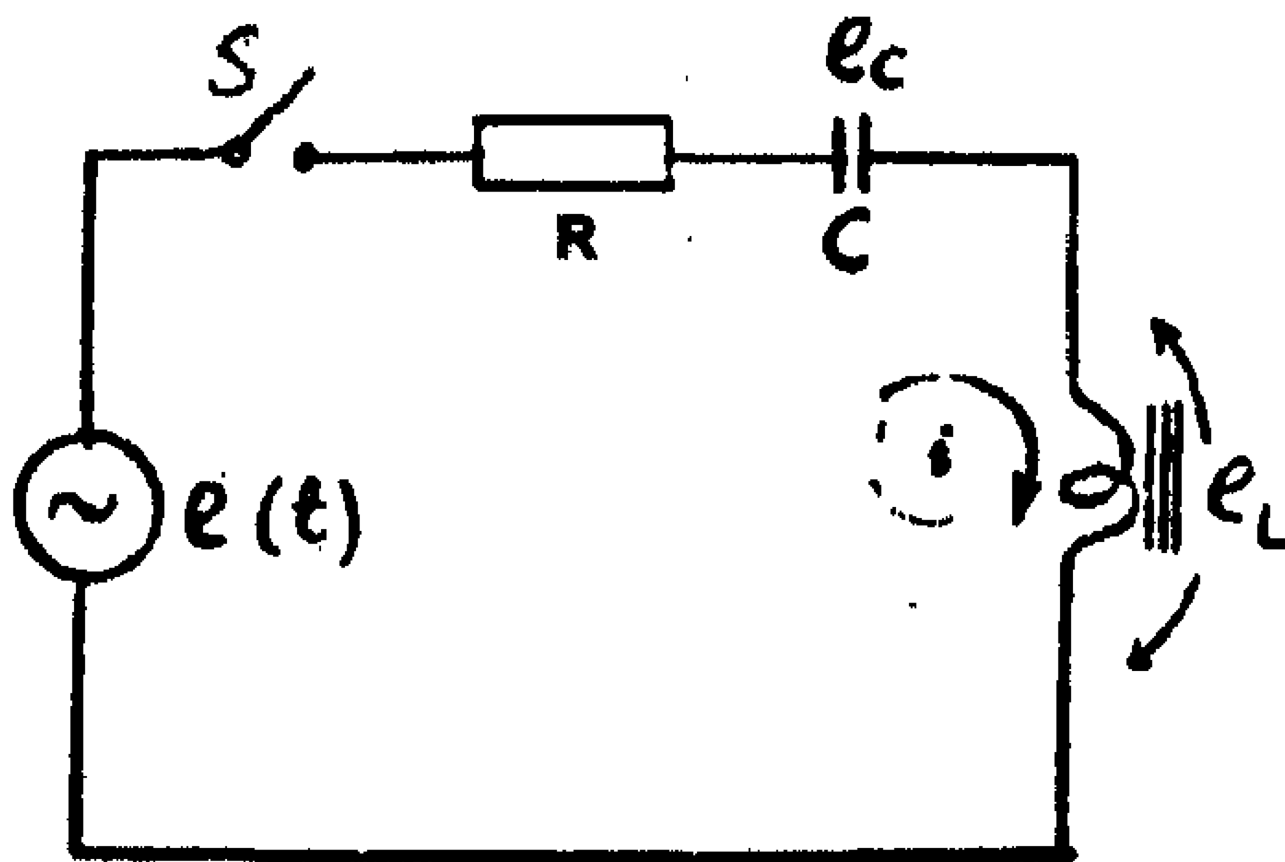
الشكل 14.12: اعتماد الجهد على سعة كنتور التذبذب الخطي على نسبة الترددات ω_0/ω

من الشكل 14.12 نرى أن أي زيادة محسوسة للجهد على السعة بالارتباط مع جهد المصدر [مثلاً، بمرتين] يحدث أثناء تغير تردد الذبذبات الطبيعية داخل حدود ضيقة جداً $(0.7\omega\text{–}1.25\omega)$. هذه الحقيقة مميزة للرنين الخطي.

الجهد الأكبر على السعة أثناء عملية عابرة يعتمد إلى حد معقول على لحظة تشغيل مفتاح الدائرة [الزاوية ψ]. فلكل نسبة محددة من ω_0/ω توجد قيمة غير مرغوبة لـ ψ يكون الجهد في النظام العابر هو الأكبر.

١٤-٣-٣ الرنين التوافقي Harmonic Resonance

الرنين التوافقي في الكنتور المتذبذب غير الخطي الأبسط [الشكل 14.13] الذي يحتوي على ملف له قلب core هو الحالة الأكثر انتشاراً للتذبذب غير الخطي. في حالة الرنين التوافقي، لا تلعب التوافقيات العليا دوراً حاسماً – لذلك– فإن الجهد والتيار في الدائرة يمكن اعتباره جيبياً في التقريب الأول ويمكن استخدام طريقة رمزية عادية لحساب الدائرة.



الشكل 14.13: أبسط كنتور متذبذب يحتوي على محاثة غير خطية

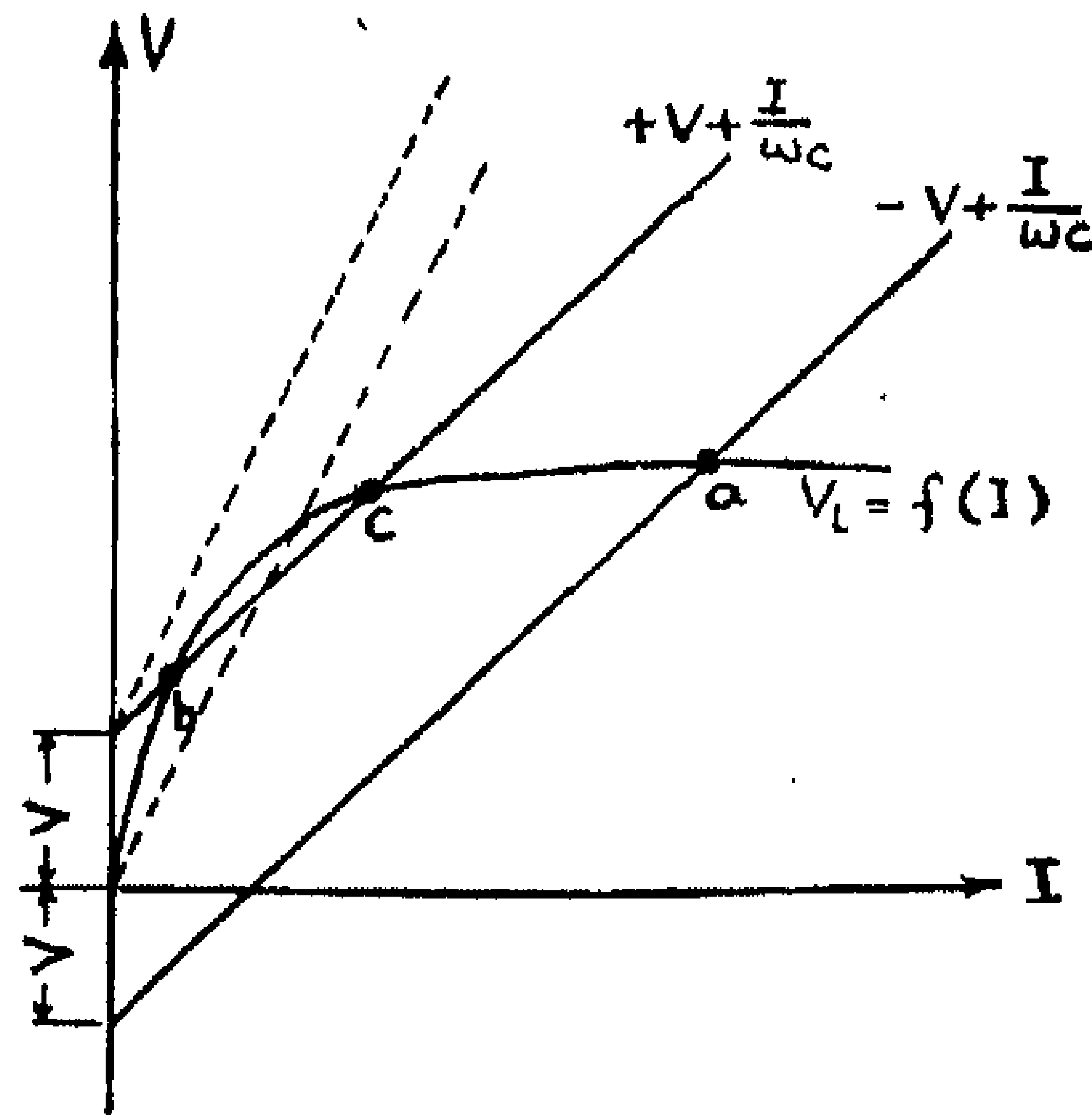
بالنسبة للنظام في الشكل 14.13، بإهمال زمن فعالية المقاومة R، يمكن أن نكتب الآتي:

$$\dot{V} = \dot{V}_L + \dot{V}_C \quad (10.14)$$

وحيث، عند عدم وجود مقاومة فعالة تكون الجهود على المحاثة والسعة متعاكسان في الطور، فمن الممكن أن نكتب الآتي:

$$\pm V = V_L - V_C \text{ أو } V_L = \pm V - V_c \quad (11.14)$$

حيث $V_C = I/\omega C$، والإشارة الموجبة تشير إلى تيارات متخلفة $(V_L > V_C)$، والإشارة السالبة إلى تيارات متقدمة.



الشكل 14.14: التحديد البياني للجهد في حالة الرنين التوافقي [$R = 0$]

وحيث إن المحاثة الفعالة للملف تُحدد بواسطة خصائص الفولت–أمبير لها، والتي تعطى عادة على هيئة رسم بياني، فإن المعادلة (14.11) يمكن أن تُحل ببساطة بيانياً. ويبين الشكل 14.14 الإنشاء المقابل لقيمتين من السعة. وتحدد القيم المكنة لجهد الحالة المستقرة في النظام بواسطة نقط تقاطع الخطوط $+V + I/\omega C$ ، $-V + I/\omega C$ مع خصائص الفولت–أمبير للملف. وكما نرى من الرسم، فإن نقط التقاطع هذه لسعات كبيرة إلى حد ما يمكن أن تكون ثلاثة، منهم اثنان يقابلان النظام الحثي وواحدة للنظام السعوي. ومع ذلك، ليست كل هذه الشروط تكون مستقرة ومن هنا لا تحدث جميعاً عملياً.

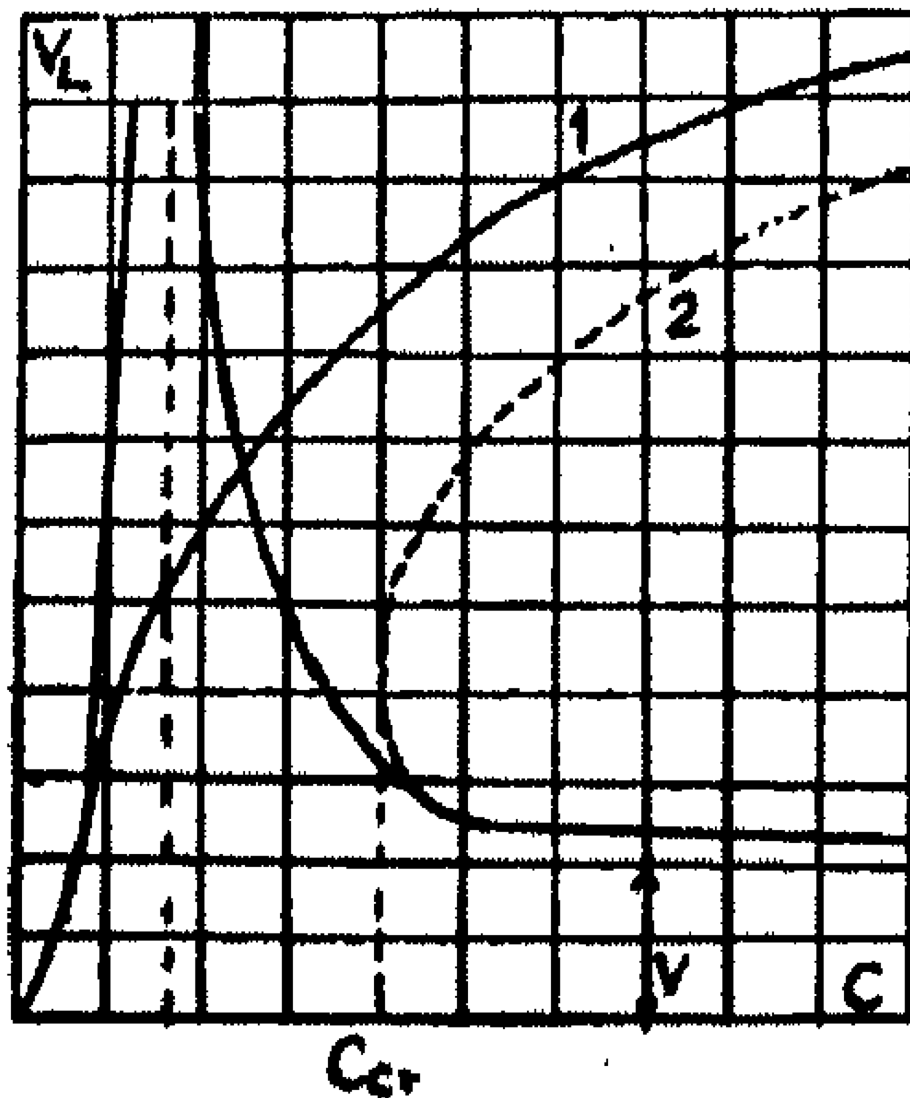
تحقيق استقرار الحل ينفذ عادة ببحث سلوك الدائرة لتغير صغير في التيار في الدائرة. في حالة الشروط المستقرة يحاول النظام الرجوع للشرط الأصلي لاضطرابات صغيرة. مثلاً، إذا وجد

في الدائرة نظام حثي يقابل النقطة b ويحدث زيادة بسيطة في التيار، فإن الجهد على المحاثة سيزداد أكبر من ذلك الذي على السعة. مجموع هذين الجهدين لن يساوي جهد المصدر، جهد عدم الاتزان يكون متفقاً في الطور مع الجهد على السعة. تحت تأثير هذا الجهد، ستنتج زيادة إضافية للتيار في الدائرة وستكون معاكسة في الطور للتيار الحثي الأصلي وبالتالي سيعوض الزيادة الصغيرة لهذا التيار والتي حدثت. وسوف يعود النظام لشرطه الأصلي ويكون النظام المقابل للنقطة b مستقراً.

ليس من الصعب أن نرى أن العلاقات عند النقطة C -والمقابلة أيضاً لنظام حثي- ستكون معاكسة بالضبط للحالة السابقة والتي بسببها فإن هذا النظام سيكون غير مستقر. وبواسطة رنين مماثل يمكن أن نوضح أن النظام السعوي عند النقطة a يكون مستقراً أيضاً.

وهكذا، حصلنا على حالة نموذجية لنظام غير خطي عندما يكون لواحد ونفس بارامترات الدائرة، يكون ممكناً ثلاثة شروط للحالة المستقرة منها اثنان فقط مستقران.

بمساعدة الرسم البياني في الشكل 14.14، لن يكون صعباً إيجاد الجهد على المحاثة، حيث تبقى خصائص الفولت–أمبير لها بدون تغيير، كدالة في قيمة سعة الكنتور.



الشكل 14.15: اعتماد الجهد على محاثة الدائرة في الشكل 14.3 على مقدار السعة لـ $r = 0$: المنحنى التناظري للمحاثة الخطية تقابل الجزء المستقيم الخطي للخصائص المغنطيسية موضح بخط رفيع

هذا الارتباط معطى في الشكل 14.15، الفرع 1 يقابل النظام الحثي، الفرع 2 النظام السعوي والخط المُشرط للنظام غير المستقر. من الشكل 14.15 من الواضح أنه، إذا كانت سعة النظام أصغر من قيمة حرجة معينة C_{cr}، فإن النظام يكون له شرط مستقر واحد. قيمة C_{cr} تقابل ميل الخط المستقيم في الشكل 14.14 الذي يكون مماساً لخصائص الفولت–أمبير للملف.

في الشكل 14.15 الاعتماد التناظري للكنتور المتذبذب الذي له محاثة خطية، قيمته تقابل ميل جزء الخط المستقيم من خصائص الفولت–أمبير للملف ذات القلب الصلب. ويكون موضحاً بواسطة خط رفيع. من مقارنة المنحنيات نرى أن الخصائص غير الخطية للملف تحد إلى حد ما من القيمة الممكنة القصوى من الجهد الزائد ولكن –عندئذ– فإنها توسع كثيراً منطقة السعة التي يتعدى فيها V_C جهد المصدر.

وسوف نبحث الآن تأثير المقاومة الفعالة للدائرة. من الممكن كتابة شرط التوازن كالآتي في وجود مقاومة فعالة:

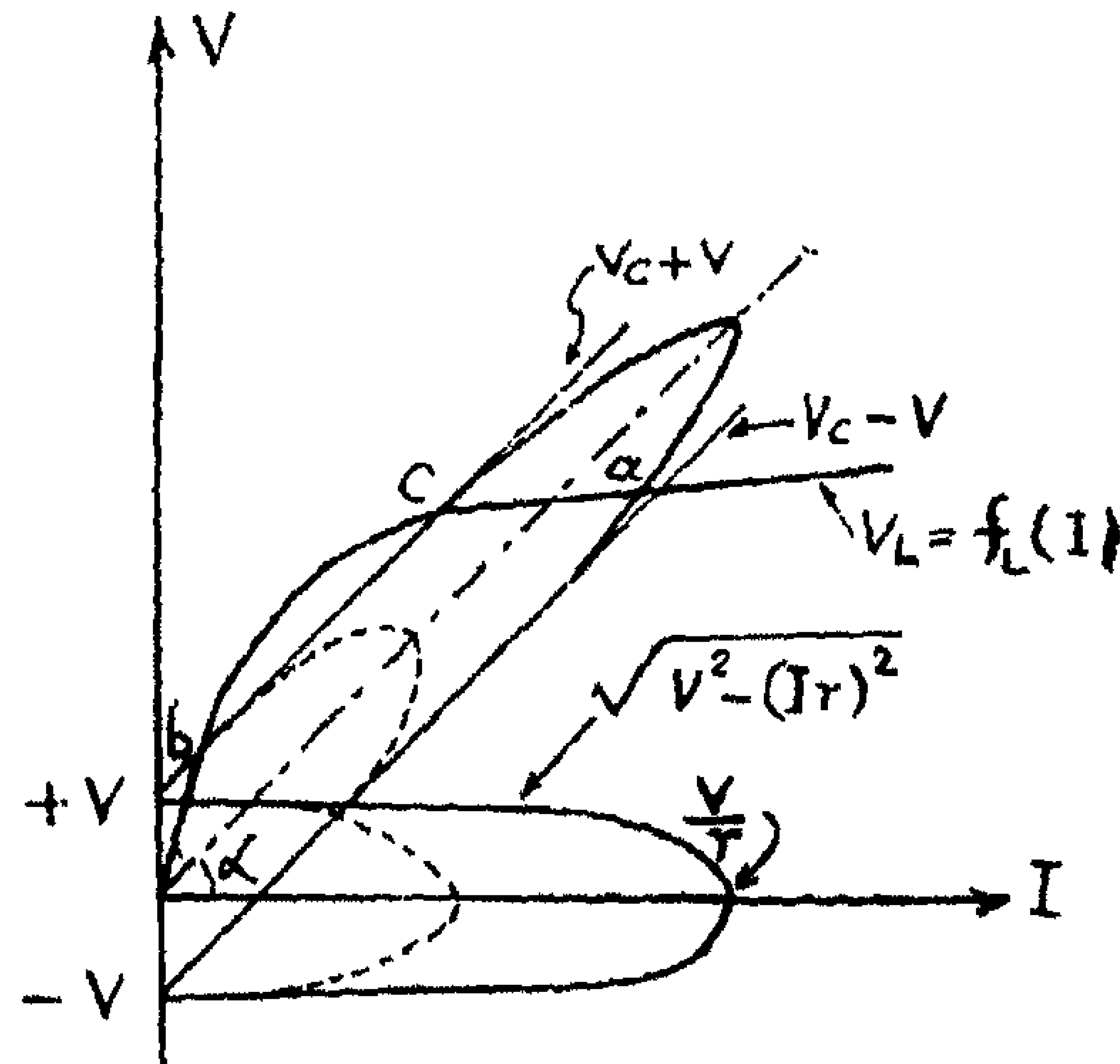
$$\dot{V} = \dot{V}_L + \dot{V}_C + \dot{V}_R \qquad (12.14)$$

وباعتبار $\dot{V}_r = \dot{I} R$ مزاح في الطور بـ 90° بالنسبة $\dot{V}_C$، $\dot{V}_L$، فمن الممكن إعادة كتابة هذا الشرط كالتالي:

$$V = \sqrt{(V_L - V_C)^2 + (I r)^2}$$

أو

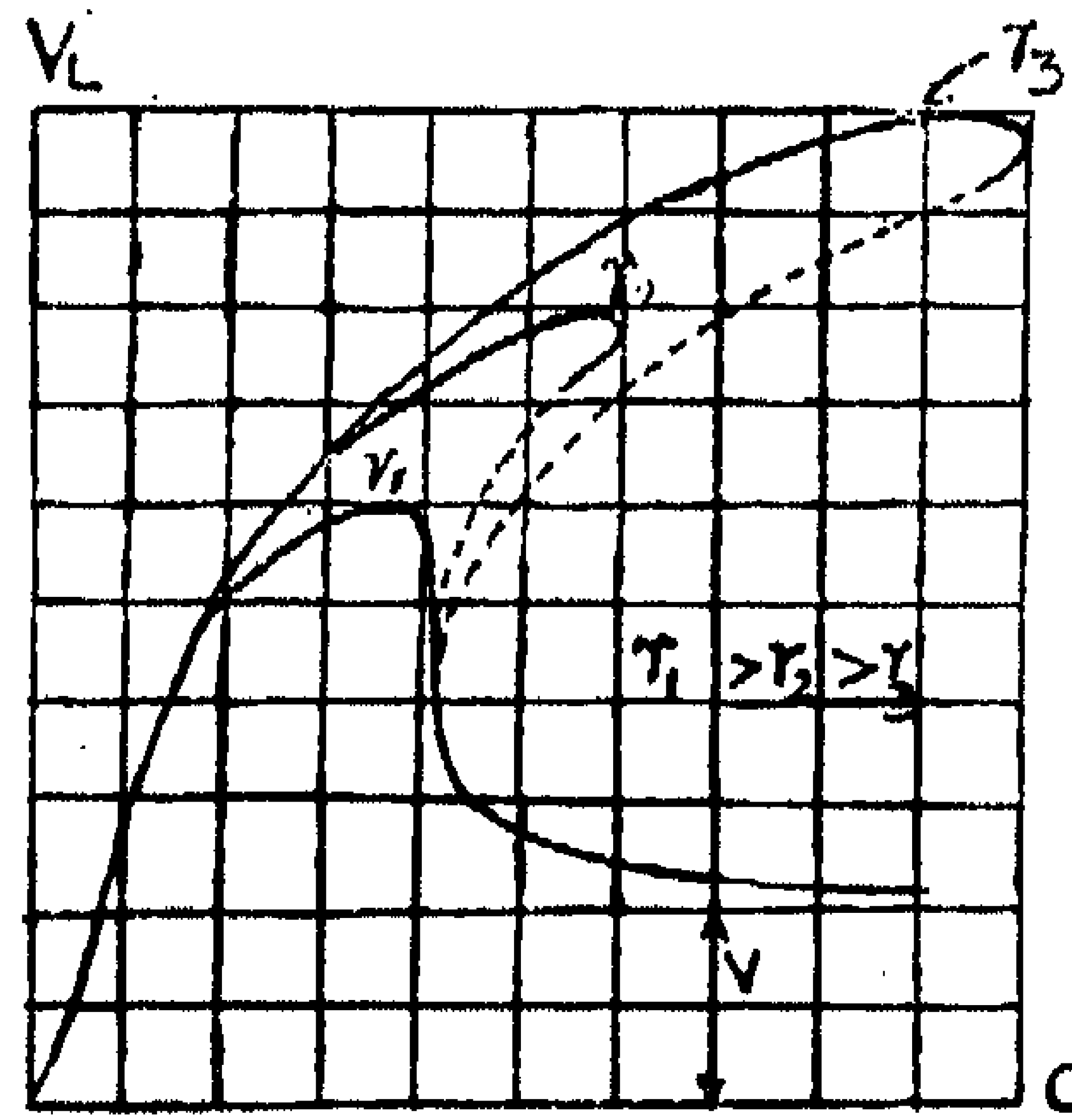
$$V_L = f_L(I) = \sqrt{V^2 - (I r)^2} + \frac{I}{\omega C} \qquad (13.14)$$



الشكل 14.16: التحديد البياني للجهد أثناء الرنين التوافقي $[r \neq 0]$

ليس من الصعب الاقتناع بأن الحد الذي على الجانب الأيمن من المعادلة (14.13) هو قطع ناقص [بيضاوي] له V، V/r أنصاف محاور. مجموع الإحداثيات الرأسية لهذا القطع الناقص ellipse والخط المستقيم المائل $V_C = I/\omega C$ تعطي الجانب الأيمن للمعادلة (14.13). نقط التقاطع المتحصل عليها من تجميع هذا المنحنى مع خصائص الفولت-أمبير للملف تحدد كل الشروط الممكنة لتوازن الدائرة [الشكل 14.16]، أحد الثلاثة حلول الممكنة [النقطة C] – كما سبق– تكون غير مستقرة. بالنسبة للحالة المبينة في الشكل 14.16 بخطوط مستمرة، فإن وجود المقاومة الفعالة –عامة– تبذل تأثيراً صغيراً على موقع نقط التوازن ومقدار قيم الحالة

المستقرة من الجهد، حيث $r \ll I/\omega C$. ومع ذلك، إذا زادت السعة أو أصبحت المقاومة الفعالة أكبر، فإن تأثيرها يزداد. بالنسبة لـ r كبيرة جداً [الخط المشرط في الشكل 14.16] فإنه يبدو ممكناً شرط حالة مستقرة واحد فقط مقابل للنظام الحثي مع جهد صغير. وبالتالي، فإن مقاومة فعالة كبيرة في القيمة تكون قادرة على تحديد القيمة القصوى الممكنة للجهد-الزائد أثناء الرنين. وهذا يكون واضحاً من الشكل 14.17 والذي فيه اعتماد $V_L = f(C)$ لقيم مختلفة من المقاومة الفعالة.



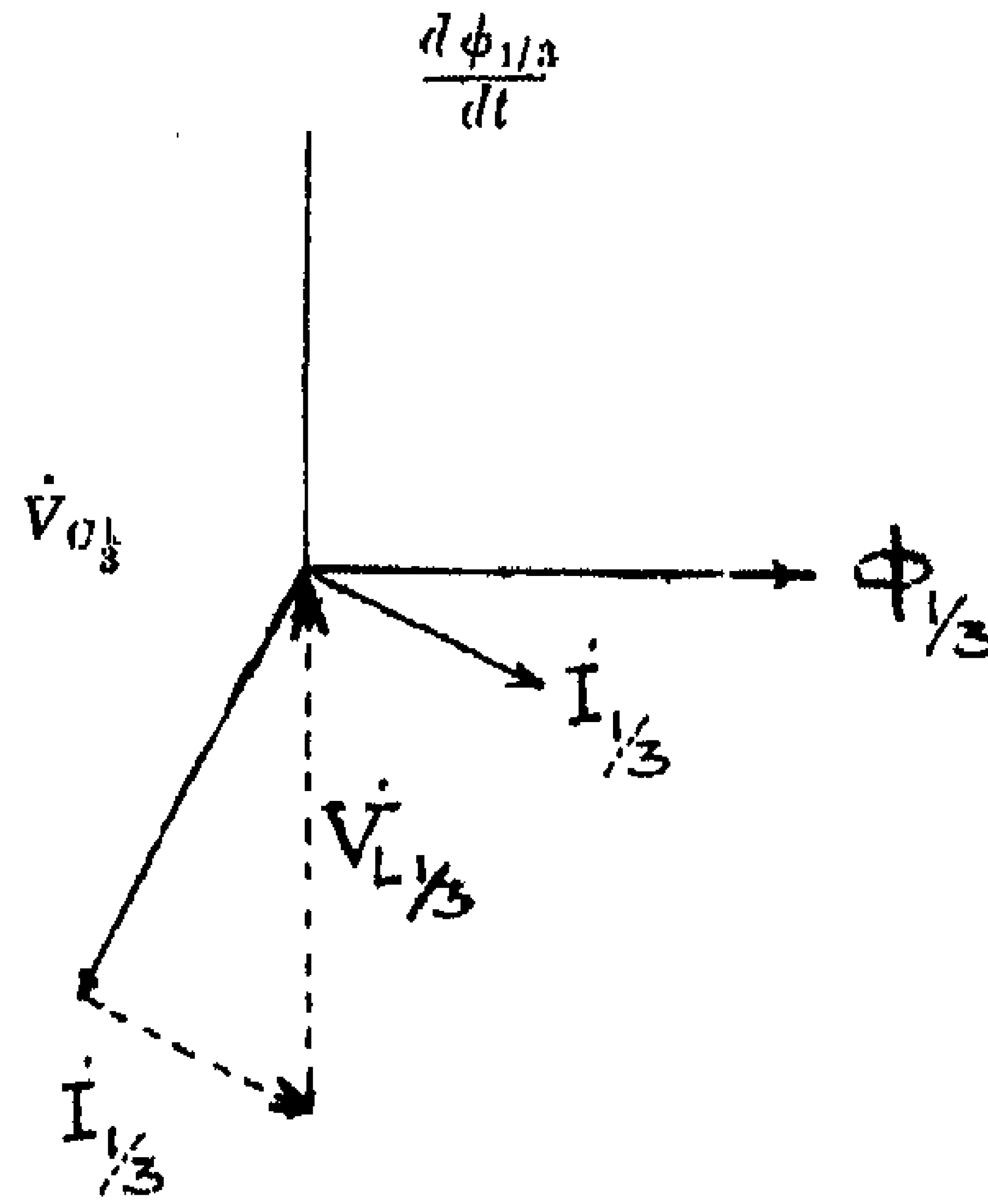
الشكل 14.17: اعتماد الجهد على محاثة مخطط الشكل 14.13 على مقدار السعة لمقاومات فعالة مختلفة

١٤-٣-٤ الرنين تحت-التوافقي Sub-Harmonic Resonance

في الدوائر الكهربية التي يتم إمدادها من مصدر جهد جيبي، يمكن أن تنتج ذبذبات ذات تردد أقل من تردد الدائرة إذا تولدت بواسطة الكنتور التذبذبي نفسه فقط والذي له التردد المقابل للذبذبات الطبيعية. ولكي تكون هذه الذبذبات مستقرة فإن مجموع هبوط الجهد الناشئ بسبب المركبة تحت التوافقية للتيار في المقاومة الفعالة، السعة والمحاثة يجب أن تساوي صفر حيث إن المصدر لا يحتوي على مركبات تحت-توافقية.

من مخطط المتجهات المبين في الشكل 14.18، نرى أن توازن المركبات تحت-التوافقية للجهود يمكن أن يتحقق فقط إذا كانت المركبة تحت-التوافقية للتيار تتخلف lags وراء المركبة تحت-التوافقية للتدفق flux في الملف بزاوية حادة معينة ووراء تحت-توافقية الجهد بزاوية منفرجة. ولأي موقع آخر للمتجهات لا يمكن أن يكون هناك توازن.

من هنا نرى أنه في الدوائر الخطية، حيث يكون التدفق دائماً متفق في الطور مع التيار، فإن الذبذبات تحت–التوافقية المستقرة لا تكون ممكنة في وجود المقاومة الفعالة.

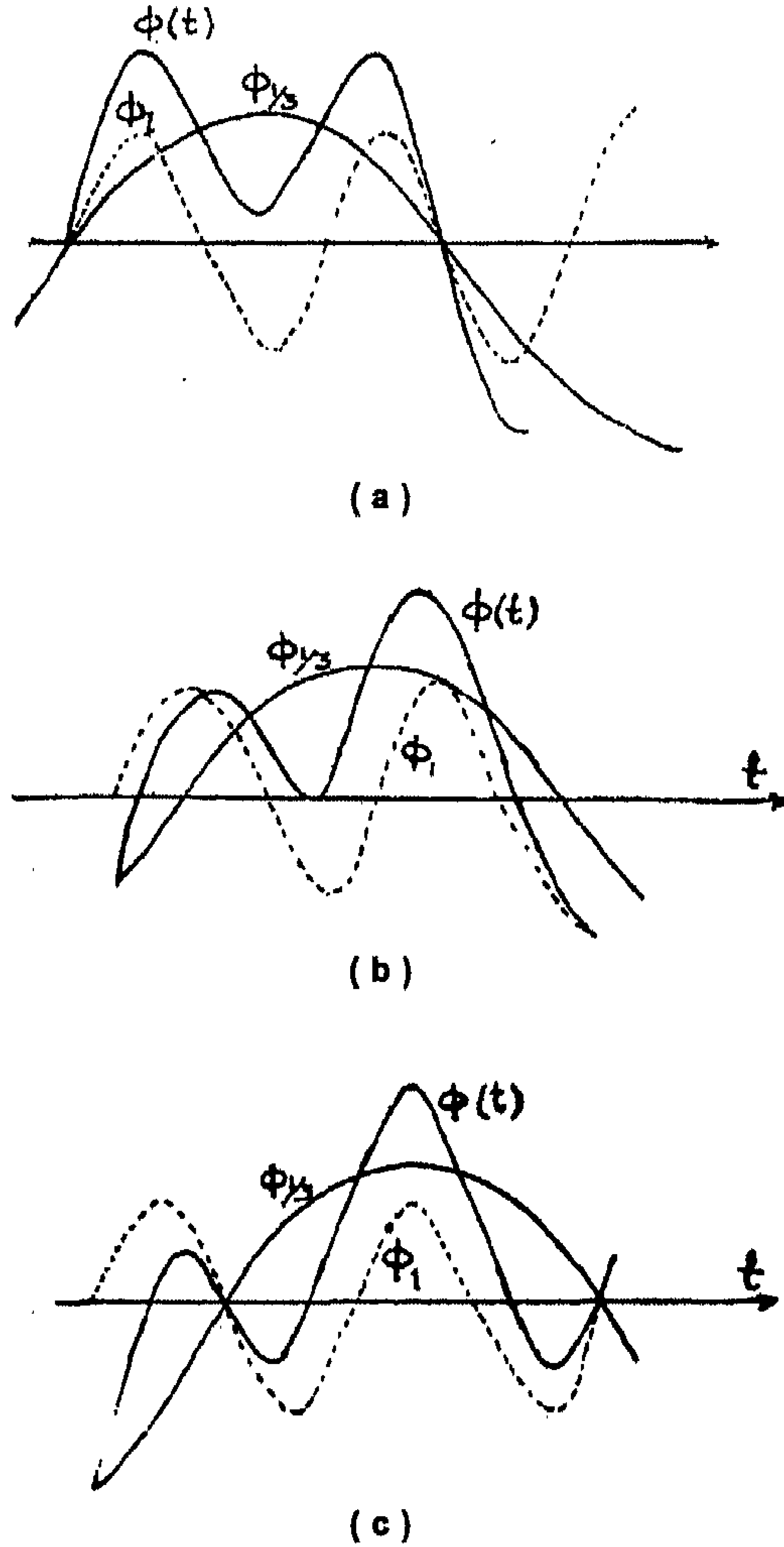


الشكل 14.18: مخطط متجهات للمركبات تحت–التوافقية للتيار والجهد والتدفق

دعنا نبحث إمكانية تواجد زاوية الطور الأساسية بين التيار والتدفق في ملف القلب الصلب. ومع ذلك في الاعتبار، سنفترض أن التدفق في الملف يحتوي على توافقية أساسية ϕ_1 وتحت–التوافقية $\phi_{1/3}$ والتي ترددها ثلث تردد الدائرة. هاتين المركبتين يمكن أن تكون موقعة بأساليب مختلفة بالنسبة لبعضها البعض. في الشكل 14.19 مبين ثلاث حالات ممكنة، الشكل 14.19(a)، 14.19(c) تناظر الشكل المتماثل للمنحنى الناتج من التدفق بالنسبة لجيبي $\phi_{1/3}$ ومنحنى الشكل 14.19(b) تكون أصغر من الثانية. ومن المهم ملاحظة أنه مع زيادة الفرق بين هاتين النهايتين العظميين، فإن المنحنى الجيبي للتوافقية–التحتية يكون مزاحاً إلى اليمين أي إلى جانب التعوق delay [التأخير].

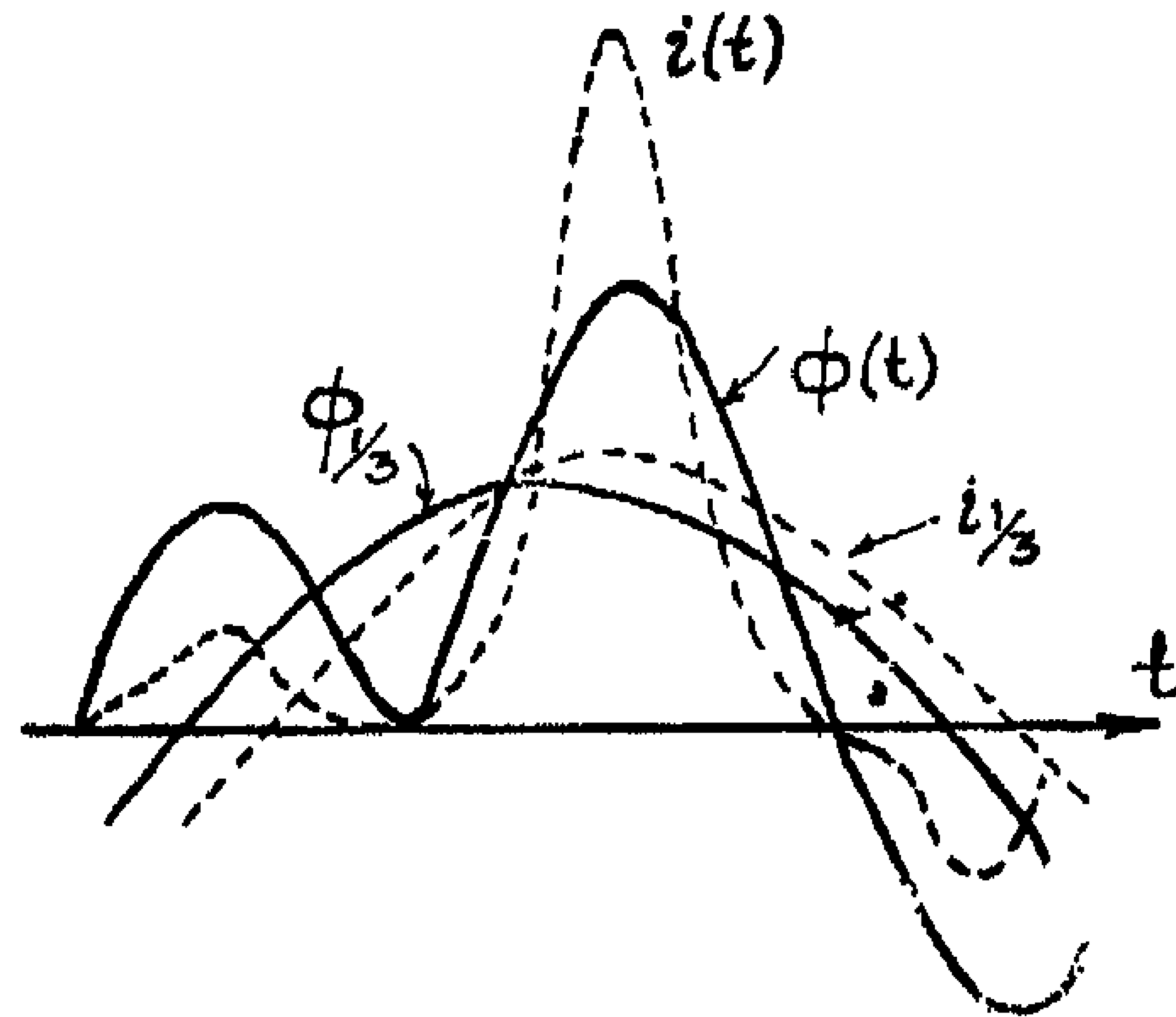
إذا أخذنا شكل محدد من منحنى مغنطة القلب core، أي الأبسط الذي يقابل المعادلة $i = a_1\phi + a_3\phi^3$ فلن يكون صعباً أن نجد منحنى التيار الناتج ومعطى شكله للحالة المبينة في الشكل 14.19(b) في الشكل 14.20. من مقارنة منحنيات التيار والتدفق، والمكررة في الشكل 14.20، نرى أن منحنى التيار له أيضاً نهايتين عظمتين –مع ذلك– فإن الفرق بينهما يكون أكبر كثيراً، وبسبب ذلك يجب توقع إزاحة التوافقيات التحتية للتيار إلى جانب التعوق [التأخير]. ومن السهل تأكيد ذلك بواسطة التحليل المباشر لمنحنى التيار في متوالية فورييه

Fourier series. المنحنى الجيبي $i_{1/3}$ المتحصل عليه بمساعدة هذا التحليل موضح أيضاً في الشكل 14.20.



الشكل 14.19: الحالات الممكنة لإزاحة الطور بين التوافقية الأساسية والتوافقية التحتية للتدفق. (a) إزاحة الطور تساوي صفر؛ (b) إزاحة الطور تساوي 1/12 من فترة التوافقية-التحتية؛ (c) إزاحة الطور تساوي 1/6 من فترة التوافقية-التحتية

مما سبق نرى أن المركبة تحت التوافقية للتيار في الملف ذو القلب الصلب يمكن أن تتأخر حقيقة وراء المركبة تحت-التوافقية للتدفق flux. ومع ذلك فإن الموقع التبادلي المحدد للمركبات الأساسية وتحت التوافقية للتدفق يكون أساسياً.



الشكل 14.20 : الشكل المحصل للتيار والتدفق للحالة الموضحة في الشكل 14.19(b)

١٤-٤ الجهود-الزائدة الداخلية في خطوط النقل طويلة المسافة

Internal Over-Voltages in Long Distance Transmission

١٤-٤-١ معلومات عامة General Information

نقل القدرة الكبيرة [آلاف من الميجاوات] عبر مسافات طويلة [في حدود 1000 km] يمكن أن يتم عند kV (500–400) وأعلى فقط. عند هذه الجهود تشكل تكلفة العزل الجزء الرئيسي من تكلفة المعدة وتصبح مشكلة تخفيض مستوى العزل ذات أهمية خاصة. وتوضح الحسابات الاقتصادية أن استخدام 500 kV يُبرر اقتصادياً فقط إذا كان مستوى العزل منخفض إلى $2.5V_{ph}$ وبالنسبة لـ 750 kV يكون أساسياً تخفيض مستوى العزل حتى قيمة $(2.0–2.2)V_{ph}$.

حماية عزل خطوط النقل الطويلة، والتي لها مستوى العزل السابق من الجهود-الزائدة الجوية، يمكن أن تضمن بمساعدة الإجراءات السابق شرحها، من هنا فإنه يجب الاهتمام بالجهود-الزائدة الداخلية التي تحظى بعدد من الخصوصيات في النقل طويل المسافة. كما هو معروف، أي خط طويل يكوّن كننتور متذبذب، فترة التذبذب الطبيعي له تتناسب طردياً مع طول الخط. فالخط الذي طوله 15000 km ومفتوح عند الطرف له تردد ذبذبة حرة يساوي 50 c/s ، لذلك يمكن حدوث ظاهرة الرنين فيه. الرنين عند التردد الأساسي يمكن أن يحدث حتى عند طول أصغر وقدرة محدودة من المصدر. ظواهر الرنين هذه يمكن اعتبارها معقدة بسبب وجود العناصر غير-الخطية [المحولات، المفاعلات]، التعقيد الكبير لأنظمة نقل المسافة الطويلة، تأثير الكورونا يظهر على موصلات الخط أثناء الجهود-الزائدة. لذلك فإن الجهود-الزائدة في النقل طويل المسافة يمكن أن يكون له صفات واسعة الاختلاف وذروات مختلفة.

في معظم الحالات تنتج الجهود–الزائدة في النقل طويل المسافة نتيجة للتوصيل المفاجئ للخط بالمصدر، تَقْطَع دائرة–القصر وهكذا. أثناء هذه العمليات، يمر النظام خلال عدة مراحل. فأثناء وقت محدد حتى منظمات إثارة المولد فإن ق.د.ك للمصدر يمكن اعتبارها غير متغيرة وتساوي المعاوقة الفعالة للمولدات x'_d أو x''_d. لذلك، يصاحب التوحيد commutation بعملية انتقالية تميل إلى نظام حالة مستقرة معين، ويحدد بواسطة بارامترات الدائرة و ق.د.ك غير المتغيرة للمصدر. فيما بعد، وبسبب فعل منظم الإثارة، فإن هذا النظام يتغير تدريجياً بالتوافق مع تغير ق.د.ك للمولد حتى ينشأ نظام حالة مستقرة جديد. المرحلتين الأولين للعملية اللتان تدومان عادة فترات قليلة تكون ذو أهمية كبيرة لنا، حيث تنتج الجهود الأعلى في هذا الوقت.

في المستقبل سنفرق بين الجهود–الزائدة لأنظمة الحالة المستقرة والأنظمة الانتقالية (العابرة)، وبفهم كامل –مع ذلك– فإن المصطلحات الفنية السابقة تكون شرطية فقط بسبب ما سبق قوله.

قانون تغير الجهد في النظام الانتقالي [التردد، التخميد] يمكن أن يكون مختلفاً ويعتمد ذلك على بارامترات الدائرة وعلى نوع التوحيد. حيث إن متانة العزل الكهربي لعدد من منشآت العزل يعتمد كثيراً على زمن تأثير الجهد، ويجب أن يعتمد أيضاً على شكل الجهد المؤثر. لذلك، لتقدير خطر الفعل على العزل من الجهود–الزائدة من هذا النوع أو ذاك. وسيكون أساسياً فرز قوانين قليلة نموذجية لتغيير الجهود الزائدة مع الزمن ولتحديد متانة العزل الكهربي للعزل منفصلاً لحالات نموذجية، عندئذ يكون من الممكن أن نؤسس إلى أي ذروة لجهد اختبار تردد القدرة يناظر الجهد الزائد ذات الشكل المعطى والذروة المعطاة، أي ما هو مستوى العزل الذي يتطلبه هذا الجهد–الزائد.

وحيث إن الجهود الزائدة للنظام الانتقالي (العابر) عادة تدوم فترات قليلة من تردد القدرة، فإن الجهود–الزائدة لنظام الحالة–المستقرة عشرات الفترات، ويتم الاختبار لدقيقة واحدة، فعل الجهود–الزائدة على العزل يكون أقل خطورة من فعل جهد الاختبار لنفس الذروة. ومع ذلك وحيث إن العمل السابق ذكره لم يتم بعد، يصبح من الضروري التزود بهامش أمان حتى تؤخذ كل الجهود–الزائدة المقابلة لتأثير دقيقة واحدة أثناء الاختبار. لذلك –إذا مثلاً– كان لعزل مستوى $3V_{ph}$، فإن الجهود–الزائدة يجب ألا تتعدى هذه القيمة لا في النظام الانتقالي ولا في نظام الحالة المستقرة.

عدد كبير من أبحاث الجهود–الزائدة نفذ في الاتحاد السوفيتي السابق أثناء فترة تصميم

وإنشاء أول محطة قدرة هيدرو 400 kV وسميت فيما بعد خط V.I Lenin-Mosco أوضحت أن الجهود–الزائدة التي لها مقدار $3V_{ph}$ تكون ممكنة في هذا الخط، ويكون من السهل صرف النظر عن إمكانية ظهور جهود–زائدة ذات ذروة أكبر بواسطة اختيار منطقي لبارامترات نقل القدرة. ولذلك تم اختيار مستوى عزل $3V_{ph}$ لأول خط نقل سوفيتي للقدرة.

تخفيض أقصى قيمة من الجهود–الزائدة إلى $2.5V_{ph}$ وأكثر حتى $2.0V_{ph}$ يمكن أن يتم فقط في حالات نادرة بإجراءات دائرة. استخدام طراز المانعة التي تحد من الجهود–الزائدة إلى القيمة الضرورية، يكون أساسياً. لذلك، فإن النقل طويل المسافة الذي له جهد 500 kV وما فوقه يصمم حالياً للحماية من الجهود–الزائدة الجوية والداخلية، والتي تميزهم عن أنظمة 220 kV وأقل حيث تكون الجهود–الزائدة الجوية فقط هي المحددة بمساعدة مانعات.

تحديد الذروة والدوام للجهود–الزائدة الداخلية مشكلة معقدة، حلها بواسطة الطرق التحليلية يكون ممكناً في الحالات الأكثر بساطة فقط. من هنا فإن أبحاث الجهود الداخلية على النماذج تستخدم على نطاق واسع. وهكذا فإلى جانب تصميم أول نقل طويل المسافة جداً عند kV (400–500)، نُفذت أبحاث كبيرة على النماذج في عدد من معاهد الأبحاث والدراسة والتي سمحت باكتشاف عدد من العمليات المعقدة فيما بعد، واكتشف أيضاً على الخطوط الحقيقية عند زمن اختبارات الجهازية وبعد البدء في التشغيل. وينفذ عمل مشابه حالياً في خطوط النقل الجاري تصميمها والمشغلة مع هدف كشف الأنظمة الأكثر خطورة، لاختيار وسائل الحد من الجهود–الزائدة، والتحقق من فعاليتها.

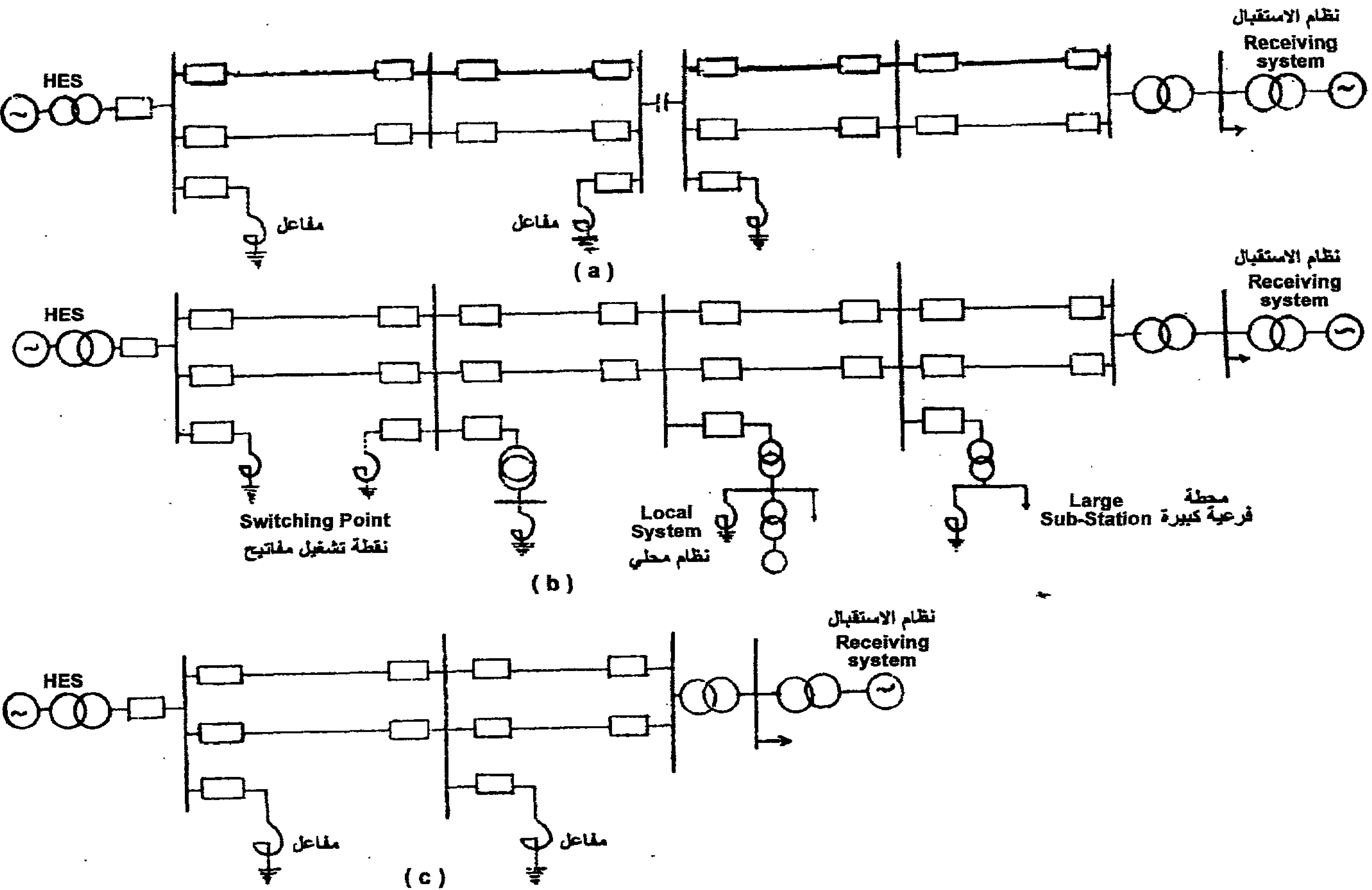
الأنواع الممكنة من الجهود–الزائدة الداخلية وأيضاً الوسائل الأفضل لتقيدها تعتمد كثيراً جداً على أنظمة النقل طويل المسافة.

١٤-٤-٢ أنظمة النقل طويل المسافة والأنظمة المؤدية إلى الجهود-الزائدة

Long Distance Transmission Schemes & Regimes Leading to Over-Voltages

يوضح الشكل 14.21 بعض أنظمة النقل طويل المسافة.

نقل القدرة الموضح في الشكل 14.21(a) لا يكون موصلاً بالأنظمة الوسطى عبر كل طوله والقدرة أيضاً لا تفرع منه، ولكنه مقسم إلى قطاعات طول كل منها km (200–300) بمساعدة محطات تشغيل مفاتيح. وينفذ النقل طويل المسافة عادة مزدوج الدائرة لزيادة الاعتمادية وبسبب وجود نقط تشغيل مفاتيح فأثناء دائرة–قصر على أحد الخطوط يفصل فقط القطاع المعطوب بدلاً من الخط الكامل وتنخفض سعة نقل الخط، ولكنها تعتبر أكبر من النصف.



الشكل 14.21 : أنظمة النقل طويل المسافة

ويتميز النقل طويل المسافة بقدرة شحن كبيرة [حوالي 500 kVA لكل كيلومتر من الدائرة المزدوجة لخط 400 kV]. في ظروف الحمل الخفيف أثناء الإمداد بطريقين من نهايتي الخط إلى مركزه يمر تيار سعوي محسوس يسبب رفع الجهد عند مركز الخط ومفقودات إضافية. وهكذا في خط طوله 900 km، في غياب نقل القدرة الفعالة بطول الخط ومع جهود متساوية عند طرفيه، فإن الجهد عند منتصف الخط يزداد بـ 13% .

إذا ثبت الجهد عند 400 kV، تكون القدرة الردية reactive power المطلوبة للخط مزدوج الدائرة أكثر من 900 MVA والمفقودات حوالي 5 MW، الجهد عند أطراف الخط تحت هذه الشروط يكون 356 kV أي 88% من الجهد الاسمي [الاعتباري nominal].

مفاعلات التوازي، الموضحة في الشكل 14.21(a)، تُعوض قدرة شحن الخط، وبسبب ذلك فإن ارتفاع الجهد والمفقودات في الخط تنخفض. وبتساوي توزيع الجهد عبر الخط، المفاعلات يسمح بزيادة الجهد عند طرفيه. التأثير المرغوب للمفاعلات في تخفيض الجهود–الزائدة الداخلية سيوضح لاحقاً. ومع ذلك، فأثناء نقل أقصى قدرة، فإن المفاعلات عند النقط الوسطى من الخط يجب أن تفصل، حيث إنها تسبب تخفيض الجهد بطول الخط، تخفض حد الاستقرار وتزيد من المفقودات.

ولتعويض المفاعلة الحثية للخط ولزيادة سعة نقلها يستخدم ما يسمى بـ"تعويض التوالي" series compensation أي توصيل مجموعة من مكثفات استاتيكية لها مفاعلة سعوية x_C على التوالي عند نقطة أو عدة نقط قليلة من الخط، نسبة x_C إلى المفاعلة الحثية للخط $x_C/x_L = k$ يسمى "درجة التعويض". ومع زيادة درجة التعويض فإن سعة النقل وحد استقرار القدرة للخط تزداد، ولكن تيار دائرة القصر يزداد آنياً أيضاً. فمثلاً بالنسبة لـ $k = x_C/x_L = 1$ ودائرة القصر عند طرف–الخط، تكون معاوقة دخل الخط قريبة من الصفر. بالنسبة لدائرة–القصر في الحال بعد وضع مجموعة المكثفات عند منتصف الخط، يحدث أن تكون السعة موصلة توالي مع نصف محاثة الخط وتصبح معاوقة دخل الخط بالنسبة لموصلات الجهد العالي سعوية في الطبيعة، أي تعوض جزئياً المفاعلة الحثية للمولدات والمحولات. ويمكن أن تصبح معاوقة دائرة–القصر صغيرة جداً وتيار دائرة–القصر بعد مكثفات تعويض التوالي كبيراً جداً، وفي أي الأحوال فإنه يتعدى التيار أثناء دائرة–قصر على الموصلات العمومية للمحطة. لذلك، تستخدم عامة درجة من التعويض أقل من 50%، في حدود (30–40)%. ومع ذلك –في ظروف ما بعد العطل– مثلاً – أثناء فصل قطاع واحد بعد

دائرة–القصر، يصبح التعويض القوي لمحاثة الخط أساسي لبقاء الاستقرار الديناميكي، في هذه الحالات فإن الزيادة قصيرة–الزمن لدرجة التعويض [تنظيم التعويض] مثلاً، بفصل جزء من المكثفات الموصلة توازي يستخدم أحياناً.

إذا مر الخط الطويل من خلال منطقة صناعية، فمن المفضل إنشاء محطة فرعية خافضة على مسلك الخط، وتوصل المحطات–الفرعية للأنظمة المحلية لـ kV (220–110). هذا النوع من الأنظمة موضح في الشكل 14.21(b) ومنه نرى أن المحطات–الفرعية الخافضة تخدم آنياً كنقط تشغيل المفاتيح. في وجود محولات خافضة عند نقط تشغيل المفاتيح، من الممكن تركيب مفاعلات تعويضية على جانب الجهد المتوسط [kV (220–110)].

في حالة نقل الطاقة عبر مسافة km (500–600) خلال مناطق منخفضة السكان ومتباعدة، يفضل أن يكون إنشاء الخطوط بدون تعويض توالي مع نقطة تشغيل مفاتيح واحدة [الشكل 14.21(c)] وتوصيل المفاعل مباشرة على الموصلات العمومية 500 kV، حيث إن تفرع القدرة عند نقطة تشغيل المفاتيح عند الجهد المتوسط غير متنبأ بها.

الأنظمة السابقة لا تستنفذ كل تغيرات الأنظمة وأنواع النقل طويل المسافة. وهكذا، في منطقة نقط تشغيل المفاتيح للنقل الموضح في الشكل 14.21(a) يمكن أن تظهر الأنظمة المحلية ونقط تشغيل المفاتيح switching points سوف تنكسر في المحطات–الفرعية للتوصيل البيني مع الأنظمة. حينئذ يمكن الحصول على نظام متغير جديد مع الأنظمة المتوسطة وتعويض التوالي.

الخواص التذبذبية للنقل طويل المسافة لا يمكن أن تنمو نمواً كاملاً إذا تم توصيل الخط [أقل من 1500 km] عند كل من طرفيه بمصادر قوية. وتحدث ارتفاعات الجهد المحسوسة أثناء اضطرابات النقل فقط. والتي يمكن أن تظهر في ظروف ما بعد العطل. بالنسبة لخطوط الدائرتين مع نقط تشغيل المفاتيح، تكون اضطرابات النقل نادرة جداً، حيث إنه في حالة الاضطراب في أحد القطاعات بسبب دائرة قصر، فإن الدائرة الموازية الثانية تستمر في العمل. ومع ذلك، فإن إمكانية اضطراب خط النقل لا تمنع تماماً، حيث إن الدائرة الثانية يمكن أن تنعزل مؤقتاً للصيانة ومن الضروري اعتبار هذه الحالات. ويزداد احتمال الاضطراب كثيراً جداً في المرحلة الأولى من إقامة خط نقل القدرة عند تشغيل دائرة واحدة فقط.لحين إنشاء الثانية.

ينخفض ارتفاع الجهد مع زيادة قدرة المحطة أو نظام الاستقبال الموصل به الخط المفتوح وبالمثل مع ظهور الأنظمة المتوسطة، حيث إن الجهود على الموصلات العمومية والنقط الوسيطة للخطوط الطويلة تكون مربوطة بـ ق.د.ك للمصدر، أي أن الأنظمة المحلية القوية تلعب دور

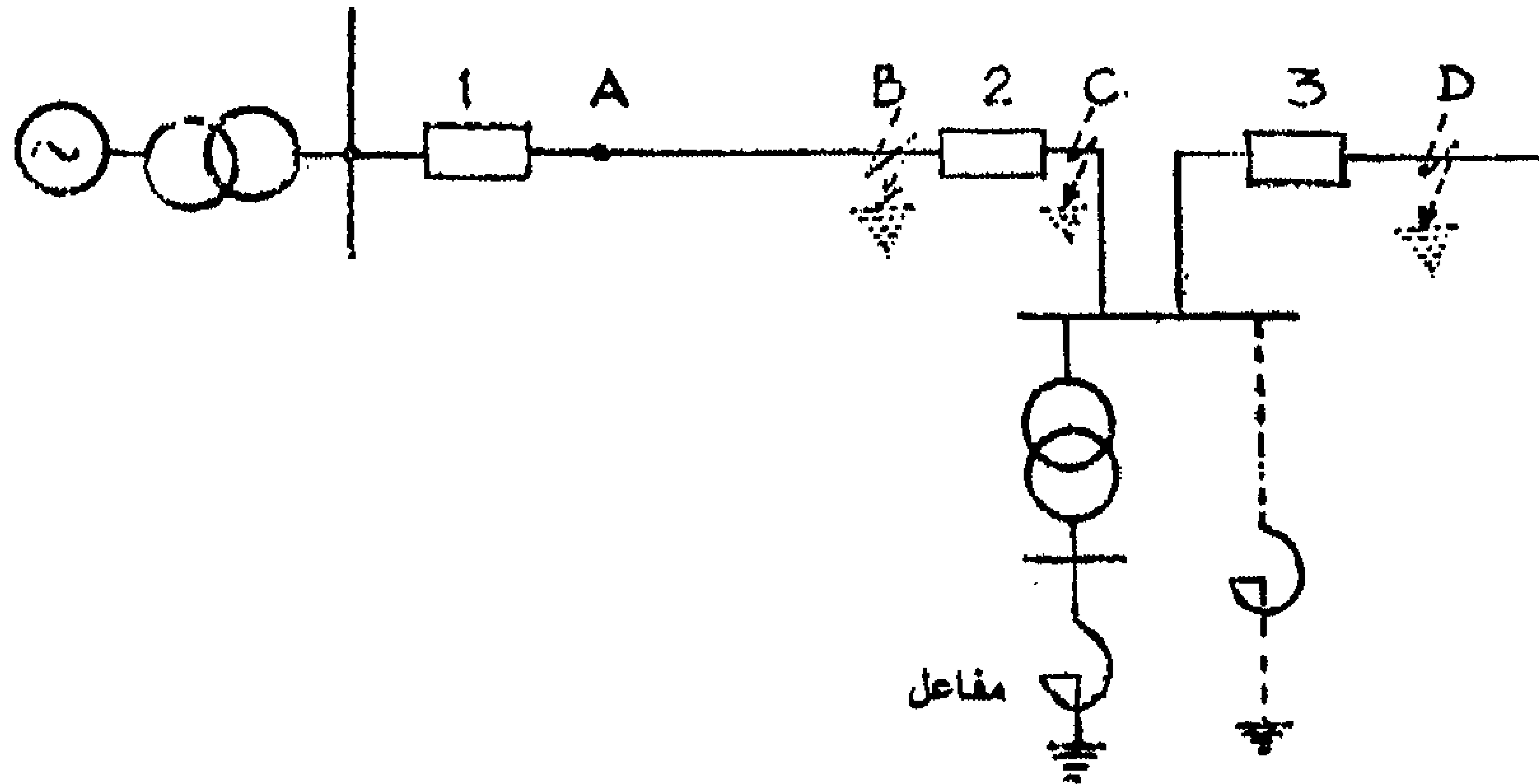
موازنات الجهد. يمكن حدوث الجهود–الزائدة الأكبر في الشروط الابتدائية نتيجة للأسباب التالية:

١. في البداية يدخل خط واحد في التشغيل.

٢. توصيل عدد غير كامل من التراكمات، أي أن قدرة محطة الإرسال صغيرة.

٣. الأنظمة المحلية والمستهلكين يمكن أن يكونوا غائبين في المرحلة الابتدائية.

لذلك، أثناء أبحاث الجهود–الزائدة الداخلية يجب إعطاء الاهتمام الأكبر للشرط الابتدائي عندما تكون ذروات الجهود–الزائدة واحتمالات حدوثها هي الأكبر.



الشكل 14.22: جزء من النظام لتوضيح الأسباب المختلفة التي يمكن أن تسبب الجهود الزائدة

وسوف نفحص التباديل المختلفة التي يمكن أن تؤدي إلى الجهود–الزائدة في المثال المميز لجزء من النظام الكهربي المبين في الشكل 14.22 كالآتي:

١. تشغيل المفاتيح المفاجئ للقطاع غير المحمل من الخط تحت الجهد [AB أو ABC بقاطع الدائرة 1].

٢. فتح الخط غير المحمل مع إعادة إشعال متعاقب ومتكرر للقوس في قاطع الدائرة 1.

٣. تقطع دائرة–القصر عند النقطة B بقاطع الدائرة 1 أو 2 مع إعادة غلق آلية متعاقبة على قاطع–الدائرة 1 بعد تصفية دائرة–القصر.

٤. تقطع دائرة–القصر عند النقطة C أو D بواسطة قاطع الدائرة 2 أو 3 عند نهاية قطاع من الخط.

٥. تقطع التشغيل اللاامتزامن بواسطة قاطع–الدائرة 2 أو 3.

ليس من الصعب أن نرى أن كل هذه الحالات تؤدي إلى إما تقطع التيار بواسطة قاطع الدائرة الموجود عند مسافة معينة من المحطة الفرعية [النقاط 4، 5] أو لفتح الخط غير المحمل مع أو بدون الشحنة المتخلفة [النقاط 1، 2، 3].

الظاهرة الانتقالية، التي تظهر في الحال بعد التباديل السابقة، تكون مختلفة لكل العمليات المذكورة بأعلى، وهي تعتمد على نوع ولحظة التباديل، على تتابع تشغيل قواطع-الدائرة في الأطوار المختلفة، وعلى الأخص أثناء تقطع دائرة-القصر غير المتماثلة. وعلى النقيض من ذلك، فإن ارتفاع الجهد لنظام الحالة المستقرة لا يعتمد على نوع التباديل ولا على النظام الانتقالي السابق، ولكن على نظام قطاع الخط الموصل إلى المصدر. فمثلاً، في الحالة السابقة، يكون تقطع النقل بواسطة قاطع-الدائرة 2 أو 3 ممكناً. في الحالة الأولى يكون خط مفتوح موصل بالموصلات العمومية للمحطة، وفي الحالة الثانية الخط مع محول غير محمل أو مع مفاعل عند الطرف. في كل من هاتين الحالتين تكون كل أطراف التوصيل الخمسة في نفس نظام الحالة المستقرة. لذلك يكون من المرغوب فيه أن نبدأ دراسة الأنواع المختلفة من الجهود-الزائدة مع تحليل نظام الحالة-المستقرة في الأنظمة المختلفة. مبدئياً، من الأساسي دراسة الخصائص الأساسية للخطوط الطويلة التي -إلى حد ما- تحدد خصائص العمليات في النقل طويل المسافة.

١٤-٤-٣ البارامترات الأساسية للخطوط الطويلة Basic Parameters of Long Lines

عند 400 kV وما فوقها تستخدم الموصلات الحزمة bundle conductors في خطوط النقل، وعلى ذلك فإن الخط يكون له سعة متزايدة ومحاثة متناقصة مقارنة مع الخطوط التي لها موصلات مفردة. قيم البارامترات الأساسية للمحطة الكهربية الهيدروفولجا خط موسكو-لينين والمتحصل عليها بالحسابات والقياسات المباشرة على الخطوط معطاة في الجدول 14.1 وهذه البارامترات تكون مميزة أيضاً لخطوط أخرى kV (500–400) مع موصلات حزمة.

وإلى جانب المحاثة، السعة، المقاومة الفعالة ذات التتابع الموجب وصفر، قيم معاوقة التموّر Z_C ، ثابت إزاحة الطور α وثابت التخميد β الذي يكون هاماً جداً في حسابات الجهود-الزائدة في النقل طويل المسافة، معطاة أيضاً كلها.

في الخطوط التي لها تسربات صغيرة مهملة التي تنتمي إليها كل خطوط الجهد العالي - إذا لم تكن هناك كورونا على الموصلات فإن ثابت الامتداد $\gamma=\beta+jx$ propagation constant يكون مساوياً للآتي:

$$\gamma = \sqrt{(r + j\,\omega L)\,j\,\omega C} = j\,\omega\sqrt{LC\left(1 + \frac{r}{j\,\omega L}\right)}$$

وباعتبار أن أي خط جهد عالي لـه نـسبة كـبيرة مـن المقاومـة إلى المفاعلـة الحثيـة، أي أن $r/\omega L \leq< 1$ فمن المكن تبسيط هذه العلاقة إلى:

$$\bar{\gamma} \cong j\,\omega\sqrt{LC}\left(1 + \frac{r}{2j\,\omega L}\right)$$

$$= \frac{r}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} + j\,\omega\sqrt{LC} = \beta + j\,\alpha \qquad (14.14)$$

معاوقة تمور الخط تساوي:

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{r + j\,\omega L}{j\,\omega C}} \cong \sqrt{\frac{L}{C}}\left(1 + \frac{r}{2j\,\omega L}\right) = Z\left(1 - j\,\frac{\beta}{\alpha}\right) \qquad (15.14)$$

حيث

$Z = \sqrt{L/C}$ = معاوقة تموّر خط عديم الفقد.

وكما نرى من الجدول 14.1 فإن بارامترات التتابع الموجبة والصفر للخط تختلف كثيراً عـن بعضها البعض بسبب مرور تيار التتابع صفر zero sequence current في الأرض. للتتابع صفر، حيث إن المجـال الكهرومغنطيـسي الكلـي يتمـدد في الهـواء، $1/\sqrt{LC} = c$ [حيـث c سـرعة الضوء]. لذلك لتردد 50 c/s تكون إزاحة الطور ثابتة.

$$\alpha = \omega\sqrt{LC} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi 50}{3\times10^5} = \frac{\pi}{3000} \text{ radians/km} \qquad (16.14)$$

أي أن الطور يتغير بـ $60°\left(\frac{\pi}{30} \text{ radians}\right)$ لكل 100 km من الخط.

تتدفق تيارات تتـابع الـصفر إلى الأرض عنـد عمـق يـساوي مئـات الأمتـار عنـد 50 cycles لذلك، تكون محاثة تتابع الصفر أكبر من التتابع الموجب، بينما سعات التتابع الموجـب والـصفر تختلف قليلاً جداً. وهكذا فإن معاوقة التمور وثابت إزاحة الطـور لتيـارات تتـابع الـصفر تـزداد مقارنة مع بارامترات التتابع الموجب المقابلة والـتي تنـاظر البيانـات في الجـدول 14.1. المقاومـة الفعالة لتتابع الصفر تزداد على أساس المفقودات إلى الأرض.

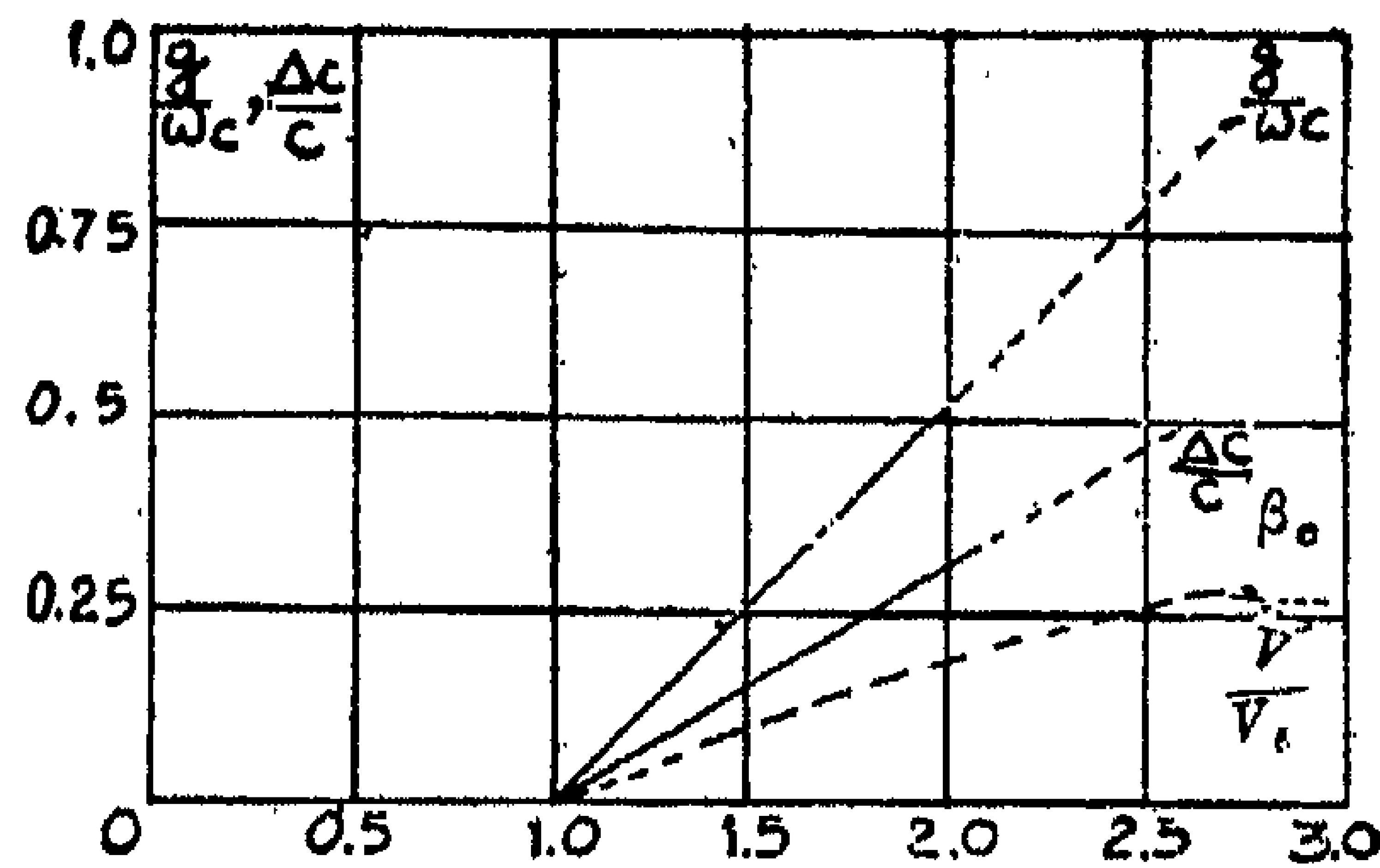
الجدول 14.1: الخصائص النموذجية للخطوط التي تستخدم موصلات حزمة

الخاصية	المحسوبة	المقاسة
(أ) تتابع موجب		
مقاومة فعالة r (Ω/km)	0.0220	0.0236
محاثة L $(\mu\text{H/km})$	0.9200	0.9200
النسبة $r/\omega L$	13.2	–
السعة C $(\mu\text{F/km})$	0.0125	0.0119
معاوقة التموّر Z_c (Ω)	270	–
ثابت إزاحة الطور (degrees/km)	6×10^{-2}	–
ثابت التخميد (β/km)	0.04×10^{-3}	–
(ب) تتابع سالب		
مقاومة فعالة r_0 (Ω/km)	0.1700	0.2600
محاثة L_0 $(\mu\text{H/km})$	3.0000	3.5000
النسبة $r_0/\omega L_0$	6.5000	–
السعة C_0 $(\mu\text{F/km})$	0.0000	–
معاوقة التموّر Z_{c_0} (Ω)	590	–
ثابت إزاحة الطور (degrees/km)	9×10^{-2}	–
ثابت التخميد (β_0/km)	0.145×10^{-3}	–

أثناء دراسة الجهود–الزائدة في النقل طويل المسافة، يجب أن نأخذ في الحسبان حدوث الكورونا على الموصلات. على خطوط النقل، تسبب الكورونا زيادة في سعة الخط والمفقودات الفعالة. وزيادة سعة الخط تزيد الطول الموجي للخط بـ %(10–20) أي أن التأثير السعوي للكورونا يكون ثانوياً. مفقودات الكورونا والتي تكون في التقريب الأول مكافئة لظهور –في الدائرة المكافئة للخط الطويل– مواصلة conductance غير خطية فعالة $g = P_c/V^2$ تلعب دوراً كبيراً حيث:

P_c = فقد قدرة الكورونا لكل طور.

V= القيمة المؤثرة للتوافق الأساسي للجهد.



الشكل 14.23: خصائص الكورونا

الأبحاث التجريبية لفقد الكورونا، نفذت بواسطة عدد من منظمات الأبحاث. منحنى الزيادة النسبية للسعة $\Delta C/C$ ونسبة المواصلة الفعالة إلى السعة $g/\omega C$ معطاة في الشكل 14.23. وتم إنشاؤها طبقاً لبيانات القياس المتحصل عليها من الخط التجريبي 400 kV . بيانات كتّاب آخرين بينت أنه في منطقة البارامترات الكبيرة $(V > 2V_c)$ يختلف منحنى تغير المواصلة عن الخط المستقيم ويميل أكثر قليلاً. ومع ذلك، لتقدير تقريبي لتأثير الكورونا، من الممكن استغلال علاقة الخط المستقيم عبر المدى الكامل للجهد ونضع معادلات الخط المستقيم على الشكل:

$$\frac{\Delta C}{C} = \theta\left(\frac{V}{V_c} - 1\right)$$

$$\frac{g}{\omega C} = \eta\left(\frac{V}{V_c} - 1\right) \qquad (17.14)$$

حيث θ ، η ظلا زاوية ميل الخطوط المستقيمة.

$$\frac{\Delta C}{C} = f_1\left(\frac{V}{V_c}\right)$$

$$\frac{g}{\omega C} = f_2\left(\frac{V}{V_c}\right)$$

بالنسبة لخط طوله صغير نسبياً [km (400–300)] يتغير فيه الجهد قليلاً بطوله، يمكن أن نأخذ ΔC ، g ليكونا ثابت لكل نقط الخط، أي أن الخط ذو الكورونا يمكن أن يمثل كخط له مواصلة فعالة وسعة ثابتتين. ثابت الامتداد لهذا الخط يساوي:

$$\dot{\gamma}_c = \sqrt{(r + j\,\omega L)[g + j\,\omega (C + \Delta C)]}$$

$$\cong j\,\alpha_c \left[1 - j\left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\beta_c}{\alpha_c}\right)\right] \quad (18.14)$$

حيث

$$\alpha = \alpha_c \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C}} \cong \alpha \left(1 + \frac{\Delta C}{2C}\right)$$

و

$$\beta_c = \alpha_c \frac{g}{2\omega (C + \Delta C)} = \frac{g}{2}\sqrt{\frac{L}{C + \Delta C}}$$

الخمد الإضافي الذي تساهم به الكورونا.

النسبة $\beta_c/\alpha_c = \beta/2\omega(C + \Delta C)$ مبينة أيضاً في الشكل 14.23.

معاوقة تمّور الخط ذو الكورونا هي:

$$\dot{Z}_{cc} = \sqrt{\frac{r + j\,\omega L}{g + j\,\omega (C + \Delta C)}} \cong Z_c \left[1 + j\left(\frac{\beta_c}{\alpha_c} - \frac{\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (19.14)$$

حيث

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C + \Delta C}} \cong Z\left(1 - \frac{\Delta C}{2C}\right)$$

التحليل النظري يبين أن خطوط الكورونا التي طولها يصل إلى 1500 km يمكن أن تمثل أيضاً كخطوط لها مواصلة ثابتة وسعة، ولكن g ، ΔC يجب أن يُحددا من جهد نظري مكافئ معين kV_2 ، حيث V_2 هو الجهد عند طرف الخط، k معامل يعتمد على البارامتر $\alpha_c l$ ويتغير من 1 إلى 0.81 عندما يتغير البارامتر $\alpha_c l$ من $0°$ إلى $90°$.

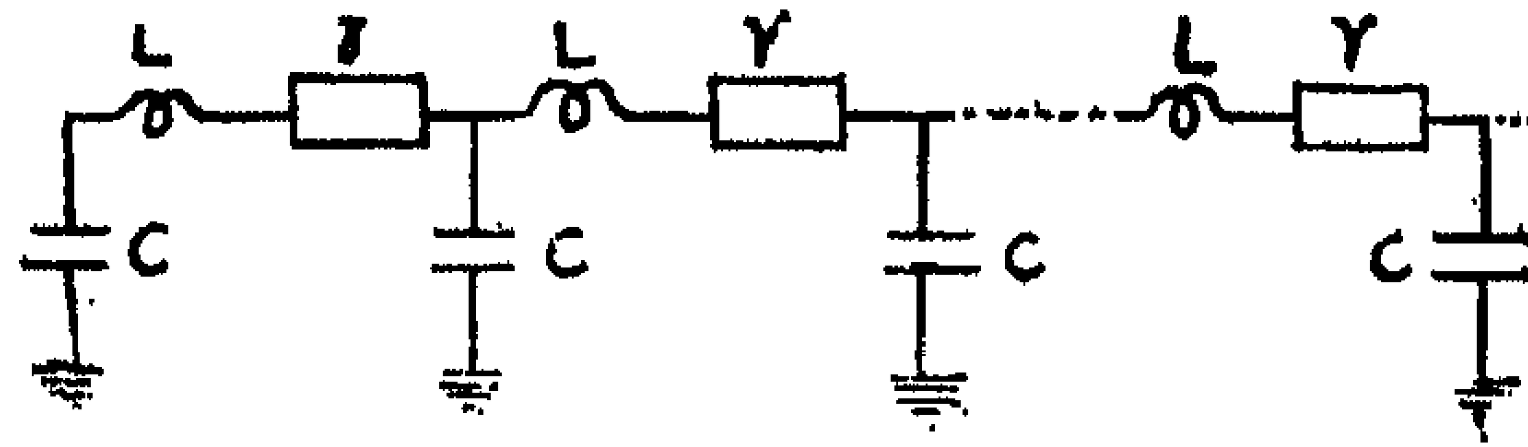
تمثيل خط الكورونا كخط له مواصلة فعالة ثابتة يكون مهماً جداً، ولكنه سيسمح لنا بأن نحصل على فكرة نوعية عن تأثير الكورونا على الجهد-الزائد وفي حالات قليلة للحصول على حتى فكرة كمية صحيحة وكافية.

١٤-٤-٤ نموذج خط طويل لأبحاث الجهود-الزائدة الداخلية

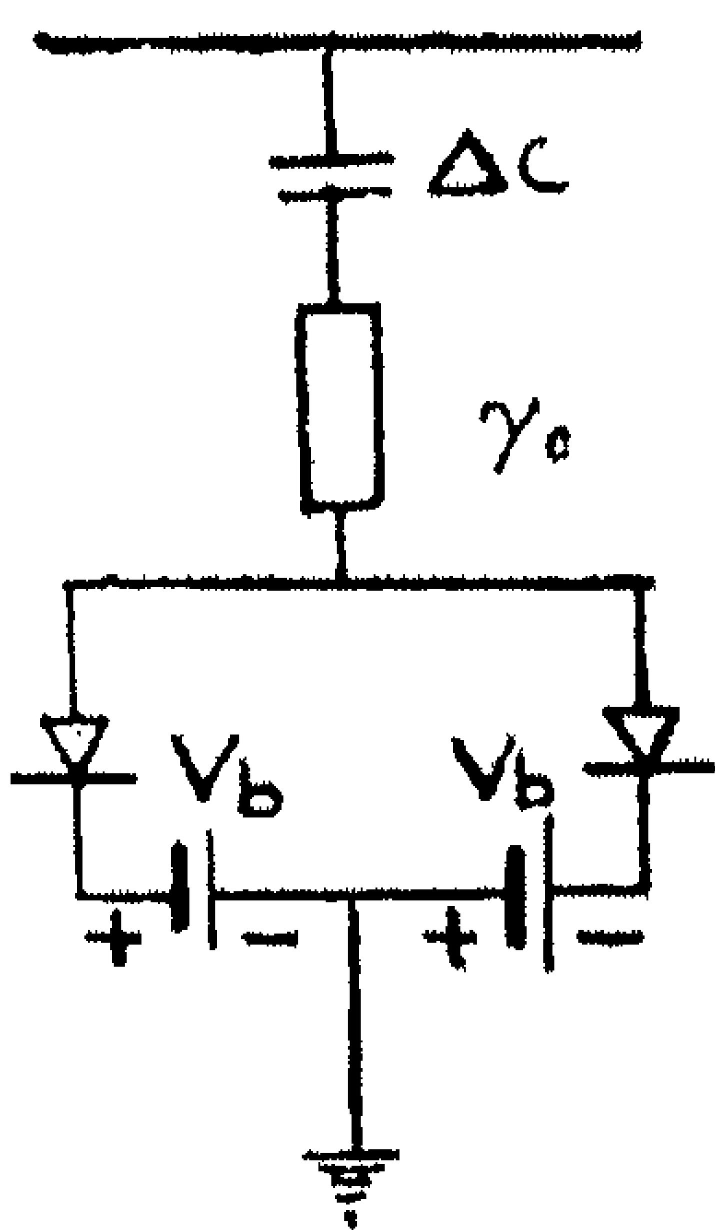
Model of a Long Line for the Investigation of Internal Over-Voltages

تعقد العمليات، التي يجب أن نتعامل معها أثناء تحليل الجهود-الزائدة الداخلية في النقل طويل المسافة، أدى إلى الضرورة الحتمية لطرق تطبيقية واسعة رياضية وفيزيائية لعمل نماذج. وحالياً تستخدم بتوسع الطرق الفيزيائية للنماذج. العنصر الأساسي للنموذج الفيزيائي للنقل طويل المسافة هو نموذج الخط الطويل المستبدل بشبكة سُلَمِّيَة ladder network من عناصر r ، L ، C.

يوضح الشكل 14.24 الشبكة السُلمِّية مفردة الطور الأكثر بساطة وتصنع النماذج الحقيقية من ثلاثة أطوار و–بجانب العناصر المذكورة سابقاً– تحتوي أيضاً على محاثات متبادلة وسعات وبالمثل معاوقات تتابع. وكلما زاد عدد العناصر التي في هذا الخط، كلما اقتربت خصائصه من خصائص نموذج الخط المعد له. ولكي لا نعقد النموذج بدون أي حاجة معينة؛ فإن عدد عناصره يتم اختيارها لتكوّن أدنى توافق مع المطالب التي ستضمن الدقة المسموحة للقياسات في حدود نسبة مئوية صغيرة. عادة يكفي استبدال طول km (30–25) من الخط وأحياناً أكبر، بعنصر مفرد.



الشكل 14.24: دائرة مكافئة لخط نقل طويل المسافة



الشكل 14.25: مخطط مبسط لنموذج الكورونا

وجود الكورونا في خط تغير من خصائصه وتبذل تأثيراً كبيراً على قيمة الجهد الزائد. لذلك، يجب أن يحتوي نموذج الخط أيضاً على عناصر تمثل نموذج تفريغ الكورونا على الموصلات. الأساس لعمل نموذج الكورونا هو قيمة جهد الكورونا الحرج V_{cr} وخصائص الفولت–كولوم للكورونا. وسوف نسترجع أن مساحة خصائص الفولت–كولوم تحدد فقد الكورونا وميله–زيادة السعة.

النظام الأساسي للنموذج الأبسط للكورونا المتصلة على التوازي مع السعة في نموذج الخط الطويل معطى في الشكل 14.25.

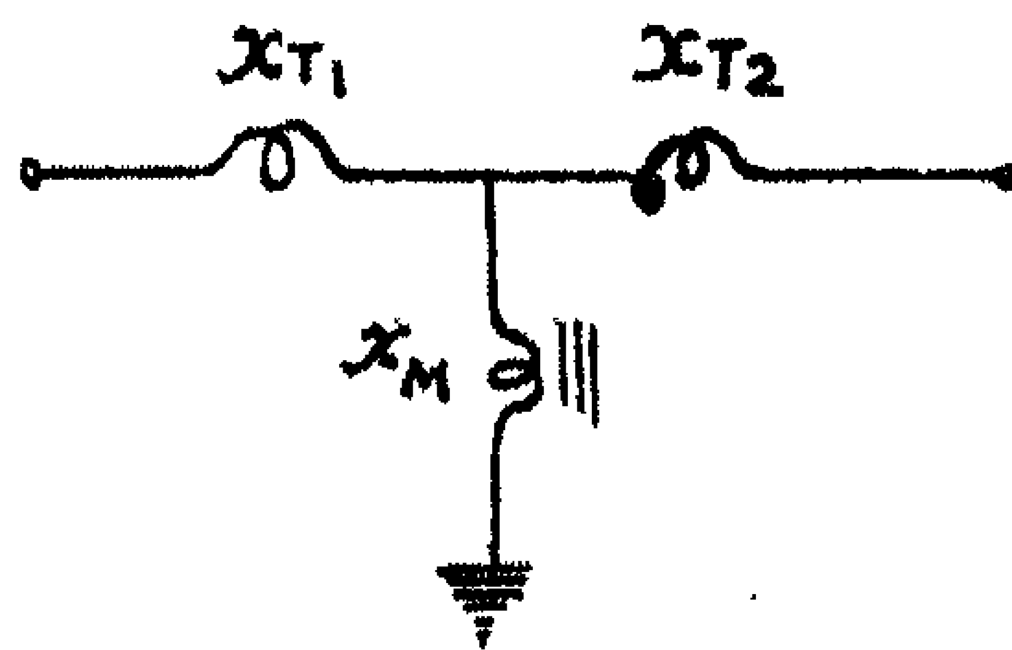
إذا وصل هذا النموذج بمصدر جهد متردد، فإن التيار لن يسري فيه حتى القيمة اللحظية للجهد المتردد المؤثر عليه لا يتعدى الجهد الثابت V_b [القطع]، معتمداً على القطبية في نصف الدورة تحت الاعتبار فالتيار سوف يمر خلال المقوِّم لذلك الفرع أو ذاك [مثلاً، بالنسبة للقطبية الموجبة خلال الفرع الأيسر]. بالنسبة لـ $r_c = 0$، فإن شحن السعة سيتوقف عند لحظة أقصى جهد، وبالنسبة لـ $r_c \neq 0$، بعد ذلك بقليل سيهبط التيار في نموذج الكورونا إلى صفر. في نصف الدورة التالي سيعمل مقوِّم الفرع الآخر ولكنه

سوف يبدأ في إمرار التيار عند جهد أقل، حيث إن السعة تكون قد شحنت إلى جهد معين يعوض القطع، وهذا يضمن إزاحة جهد بدء الكورونا في أنصاف الدورات الثانية والمتعاقبة على جانب القيم الأصغر من الجهد، وهذا يماثل ما يحدث فعلياً في الخطوط الفعلية.

جهد القطع على مقياس عمل النموذج يجب أن يقابل جهد بدء الكورونا في نصف الفترة الأولى، أي عندما لا توجد شحنات حجم حول الموصل. شحن السعة ΔC يلعب أيضاً نفس الدور مثل شحنات الحجم للكورونا حول موصل الخط الحقيقي. في النهاية، الجهد الذي عنده تبدأ المقومات في أنصاف الفترات الثانية والتالية للعمل يكون مساوياً لجهد بدء الكورونا عند الجهد المتردد للحالة المستقرة [مع اعتبار المقياس]. شكل التيار في النموذج يكون مماثلاً لشكل التيار في خط حقيقي، التيار في النموذج يبدأ السريان بعد وصول الجهد على الخط إلى جهد الكورونا [في النموذج المعطى] ويتوقف بعد شحن السعة ΔC ، أي عند لحظة النهاية العظمى أو بعدها بقليل.

بتغيير قيمة جهد القطع لـ ΔC ، r_c ، من المكن تغيير خصائص الفولت–كولوم للكورونا وبالتالي بارامترات خط الكورونا. شكل خصائص الفولت–كولوم أو شكل تيار الكورونا يعتمد إلى حد كبير على المقاومة r_c والمقاومة الداخلية للمقوِّمات. ليس من المعقول إعادة إنتاج شكل خصائص الفولت–كولوم بمساعدة النظام الأبسط، يستخدم نظامان أو أكثر موصلة على التوازي والتي تختلف عن بعضها بقيم جهد القطع والثوابت r_c ، ΔC .

عمل نماذج العناصر المتبقية من النقل طويل المسافة لا يمثل صعوبات من حيث المبدأ. وهكذا –فمثلاً– يتم عمل نماذج المكثفات بواسطة السعات والمفاعلات بواسطة المحاثة، مقدار كل من هذه العناصر يحدد بواسطة المقياس المستخدم للنموذج. المحولات تمثل إما بواسطة نماذج محولات أو بواسطة دائرة مكافئة طراز–T [الشكل 14.26] وفيها x_{T_1} ، x_{T_2} يقابلان محاثات تسرب اللفات الابتدائية والثانوية x_M تمثل محاثة المغنطة، [هذا الفرع من الدائرة المكافئة يسمى عادة "التفرع المغنطيسي"] التفرع المغنطيسي لنموذج المحول يجب أن يكون له خصائص فولت–أمبير غير خطية تقابل خصائص الفولت–أمبير للمحول الحقيقي.



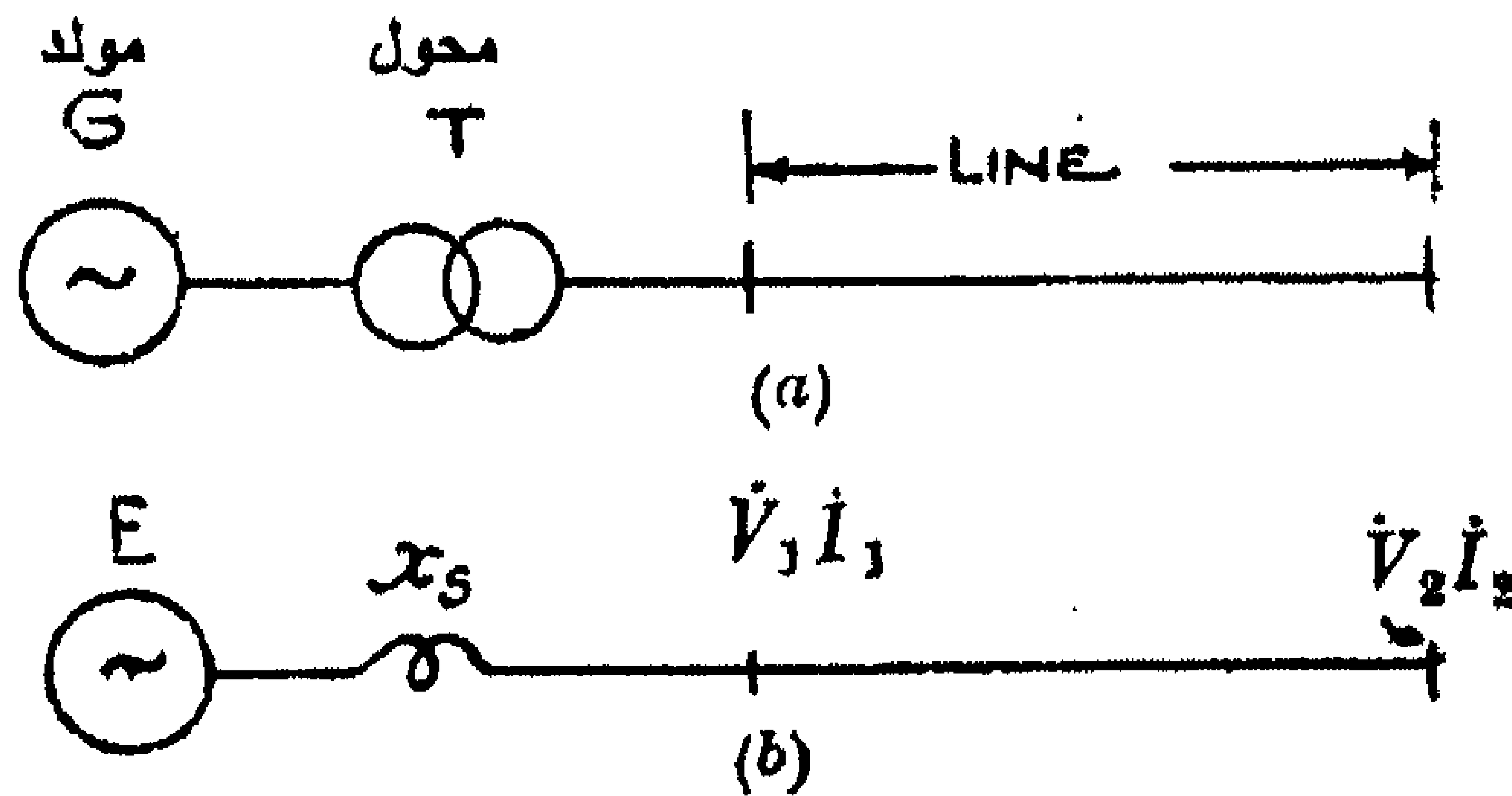
الشكل 14.26: دائرة مكافئة طراز–T لمحول

الصعوبة الرئيسية في عمل نماذج المفاعل وعلى الأخص المحولات هي الضرورة المطلقة لأن يكون لدينا في نماذج السعة الصغيرة نسبة عالية من خصائص المقاومة إلى المفاعلة للمحول الحقيقي والمفاعلات.

١٤-٤-٥ ارتفاع جهد نظام الحالة المستقرة في الأنظمة الأبسط بدون اعتبار التفرع المغنطيسي للمحول

Voltage Rise of Steady-State Regime in the Simplest Schemes without the Consideration of the Magnetic Shunt of the Transformer

أنظمة النقل طويل المسافة في النظام مفتوح–الدائرة يمكن أن تكون مختلفة –ولكن– في أي الحالات فإنها تحتوي على ثلاثة عناصر أساسية: مولد، محول، والخط [الشكل 14.27(a)]. وبالرغم من البساطة الخارجية لهذا النظام، فإن تحليله معقداً بسبب وجود عنصران غير خطيان، هما المحاثات المغنطة للمحول وخط الكورونا، بالإضافة إلى ذلك، فإن الأخير له عدم خطية موزعة. تأثير هذان العنصران يكون مختلفاً. التفرع المغنطيسي للمحول يمكن أن يرجح ظهور عمليات رنين معقدة. تفريغ الكورونا على الخط، حيث إنها مرتبطة بحدوث مفقودات طاقة، أساساً تخمد الذبذبات وتُحد من الجهود–الزائدة.



الشكل 14.27: نظام مبسط لخط نقل طويل غير محمل

ولكي نفهم بوضوح تأثير العوامل المختلفة على نمو الجهود–الزائدة في النقل طويل المسافة –دعنا ندرس في البداية– الدائرة المكافئة في الشكل 14.27(b)، والتي فيها يكون التفرع المغنطيسي للمحول غير موجود والمفاعلة الحثية:

$$x = x'_d + x_{T_1} + x_{T_2}$$

ونتذكر أنه في غياب جهود الكورونا $\dot{V}_1$، $\dot{V}_2$ والتيارات $\dot{I}_1$ ، $\dot{I}_2$ عند بداية ونهاية الخط الطويل يكونون مرتبطين بالمعادلات الآتية:

$$\left.\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_2 \cosh \dot{\gamma} l + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \sinh \dot{\gamma} l \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_2}{\dot{Z}_c} \sinh \gamma l + \dot{I}_2 \cosh \dot{\gamma} l \end{aligned}\right\} \qquad (20.14)$$

في نظام الدائرة المفتوحة عندما يكون الخط مفتوح عند الطرف $I_2 = 0$ و

$$\left.\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_2 \cosh \gamma l \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_2}{\dot{Z}_c} \sinh \dot{\gamma} l \end{aligned}\right\} \qquad (21.14)$$

النسبة $V_1/I_1 = \dot{Z}_{in}$ تسمى "معاوقة دخل الخط"، وكذلك:

$$\dot{Z}_{in} = \dot{Z}_c \coth \gamma l \qquad (22.14)$$

حيث إنه بالنسبة لخط قدرة $\dot{\gamma} l = \beta l + j\,\alpha l$

$$\dot{Z}_c = \dot{Z}\left(1 - j\frac{\beta}{\alpha}\right)$$

وبالنسبة لطول خط حتى 1500 km، $\beta l \ll 1$ ولذلك $\cosh \beta l \approx 1$، $\sinh \beta l \approx \beta l$ سيكون لدينا:

$$\dot{V}_2 = \frac{\dot{V}_1}{\cos \alpha l + j\,\beta l \sin \alpha l} \qquad (23.14)$$

$$\dot{Z}_{in} = -j\,Z\left(1 - j\frac{\beta}{\alpha}\right)\frac{\cot \alpha l - j\,\beta l}{1 + j\,\beta l \cot \alpha l} \qquad (24.14)$$

أو

$$\dot{Z}_{in} \cong r_{in} - j\,Z \cot \alpha l \qquad (25.14)$$

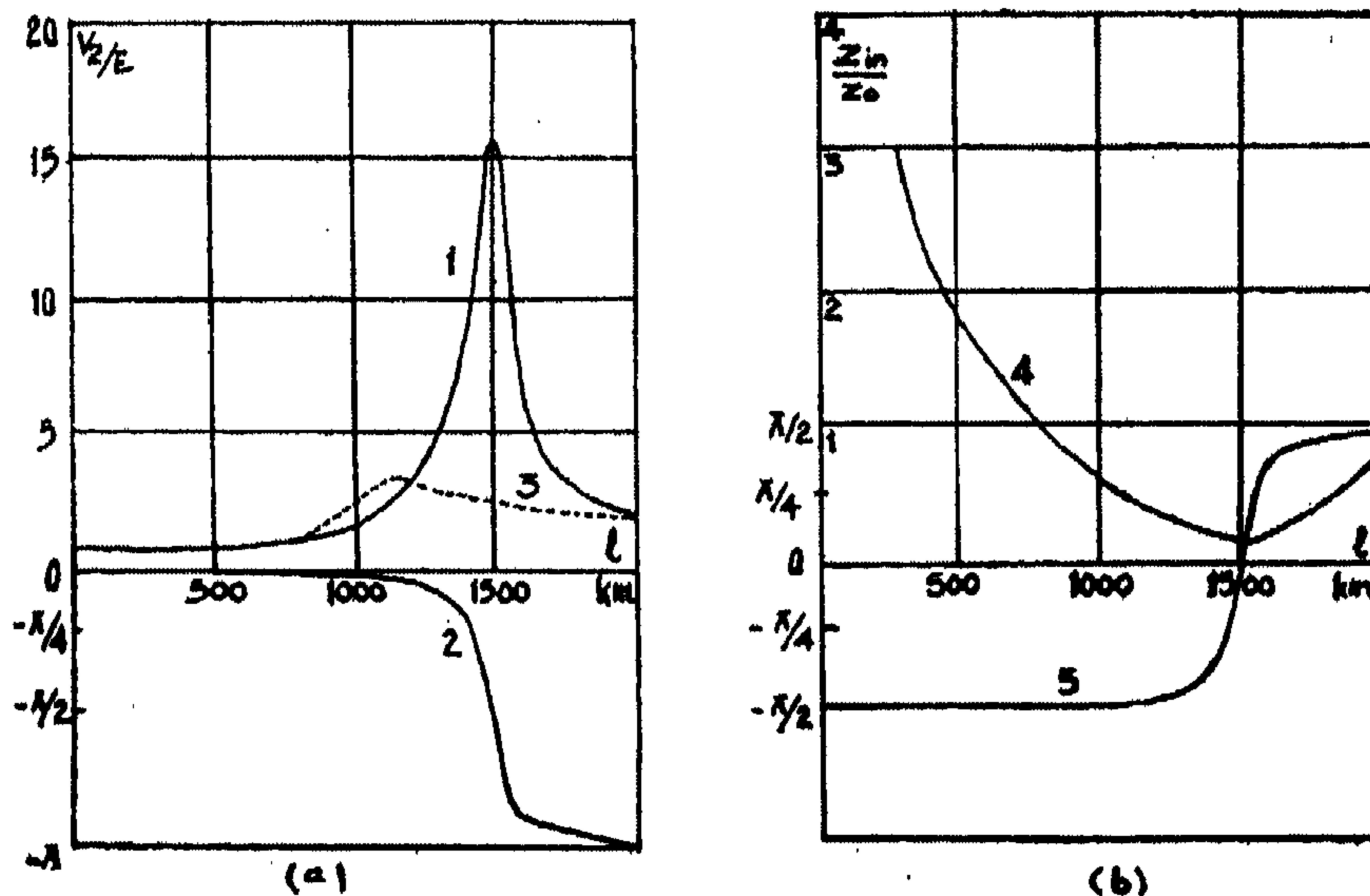
حيث المركبة الفعالة لمعاوقة الدخل

$$r_{in} \cong Z\left(\beta l + \frac{\beta}{\alpha}\cot \alpha l + \beta l \cot^2 \alpha l\right) \cong Z\,\beta l$$

الآن وقد تعلمنا هذه العلاقات الأساسية للخطوط الطويلة، فسوف نبحث حالات قليلة مميزة.

(أ) الخط الموصل بمصدر ذات قدرة غير محدودة **The Line Connected to a Source of Infinite Power**

في هذه الحالة يُحَدَّد الجهد عند طرف الخط مباشرة من المعادلة (14.23)، حيث V_1 يساوي ق.د.ك للمصدر $E'_d = E$.



الشكل 14.28 : منحنيات الرنين لخط نقل. $\beta = 0.42\times10^{-2}/\text{km}$. $\beta/\alpha = 0.04$. (1) معامل الجهد عند نهاية الخط؛ (2) طور الجهد عند نهاية الخط؛ (3) الجهد عند نهاية الخط في وجود الكورونا؛ (4) معامل معاوقة الدخل للخط $[Z_{in}/Z_o]$ ؛ (5) طور جهد الدخل للخط

اعتماد المعامل modulus وطور الجهد عند نهاية الخط على طوله عند تردد 50 c/s موضح في الشكل (a)14.28 والمنحنيات المناظرة لمعاوقة الدخل معطاة في الشكل (b)14.28. هذه المنحنيات لها شكل مميز للكنتورات التذبذبية –وعلاوة على ذلك– بالنسبة لطول 1500 km يحدث الرنين عند تردد المصدر ويكون الجهد عند نهاية الخط محدوداً فقط بالمفقودات الفعالة في موصلات الخط:

$$V_{2_{max}} = \frac{E}{\beta l} = \frac{E}{\frac{\beta}{\alpha}\cdot \alpha l} = \frac{E}{\frac{rl}{2Z}} \qquad (26.14)$$

فتح الخط عند النهاية يكون مكافئاً لكنتور متذبذب له فترة تذبذب التوافق الأساسي $T = 4l/v$. ليس من الصعب أن نرى أنه بالنسبة للخطوط العلوية، التي فيها

$v = c = 300{,}000$ km/sec ، $l = 1500$ km ، $T = 4\times1500/300{,}000 = 0.02$ sec. أي تنطبق مع فترة تذبذب المصدر.

كما في الكنتور التذبذبي الأبسط، بالنسبة لـ $l < 1500$ km –أي قبل الرنين– تكون معاوقة الدخل للخط سعوية في الطبيعة، ويكون التردد الأساسي للتذبذب الطبيعي له أكبر من تردد المصدر. وعلى العكس، بالنسبة لـ $l > 1500$ km –أي بعد الرنين– تكون معاوقة الدخل حثية في الطبيعة والتردد الطبيعي للخط يكون أقل من تردد المصدر.

في الخطوط الحقيقية، الجهد V_2 –طبعاً– يمكن أن لا يصل إلى تلك القيم الكبيرة المبينة في الشكل 14.28، حيث من قبل عند جهد $(1.2\text{–}1.5)V_{ph}$ فإن الكورونا –مغيرة خصائص تموّرها– تحدث على الخط. منحنى الرنين المتحصل عليه على نموذج الخط مع اعتبار الكورونا، موضح بالخط المنقط في الشكل 14.28. كما يمكن أن نرى، وبسبب الزيادة في سعة الخط تحت تأثير الكورونا فإن النهاية العظمى للمنحنى [نقطة الرنين] تُنقل في منطقة الأطوال الصغيرة. للأطوال الصغيرة من الخط عندما يكون النظام بعيداً عن الرنين والمفقودات الفعالة لا تعلب دوراً فعالاً ولكن الكل متساوي، بسبب الزيادة في سعة الخط، تسبب الكورونا زيادة معينة في الجهد ولكن أقصى جهد أثناء الرنين ينخفض كثيراً و–في وجود الكورونا– يكون في حدود $3V_{ph}$.

وبنسب المواصلة الفعالة والسعة الإضافية لخط الكورونا، من الممكن تقدير النهاية العظمى لمنحنى الرنين تحليلياً أيضاً وذلك بالتعويض في المعادلة (14.26) عن α ، β بالكميات المقابلة من المعادلة (14.18).

$$V_{2_{max}} = \frac{E}{\left(\dfrac{\beta}{\alpha}+\dfrac{\beta_c}{\alpha_c}\right)\alpha_c\, l} \qquad (27.14)$$

حيث إن بارامترات خط الكورونا α_c ، β_c تعتمد على الجهد عند النهاية، فإن المعادلة (14.27) يمكن أن يتم حلها بطريقة "المحاولة والخطأ" أو بيانياً.

(ب) الخط موصل بالمصدر خلال معاوقة $Z_s = r_s + j\omega L_s$

The Line is Connected to the Source through an Impedance $Z_s = r_s + j\omega L_s$

بإحلال الخط بمعاوقة دخله Z_{in} ، فإن الجهد عند بداية الخط يمكن إيجاده من العلاقة التالية:

$$\dot{V}_1 = \frac{E\,\dot{Z}_{in}}{\dot{Z}_s + \dot{Z}_{in}} = E\,\frac{r_{in} - j\,Z\cot\alpha l}{r_s + j\,\omega L_s + r_{in} - j\,Z\cot\alpha l} \qquad (28.14)$$

حيث r_{in} ، Z_s هما المركبات الفعالة لمعاوقة الدخل والمعاوقة الموصلة قبل الخط.

إذا زودت هذه المعادلة بالأدلة المقابلة (Z_c, α_c) فإنها يمكن أن تنطبق أيضاً على خط الكورونا.

في تلك الحالات عندما $\omega L_s \neq Z\cot\alpha l$ [النظام بعيد عن الرنين]، من الممكن إهمال المركبات الفعالة للمعاوقات وأيضاً التأثير المقابل للكورونا:

$$V_1 = E\,\frac{Z\cot\alpha l}{Z\cot\alpha l - \omega L_s} = E\,\frac{\cos\alpha l}{\cos\alpha l - \frac{\omega L_s}{Z}\sin\alpha l} \qquad (29.14)$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos\alpha l} = E\,\frac{1}{\cos\alpha l - \frac{\omega L_s}{Z}\sin\alpha l} \qquad (30.14)$$

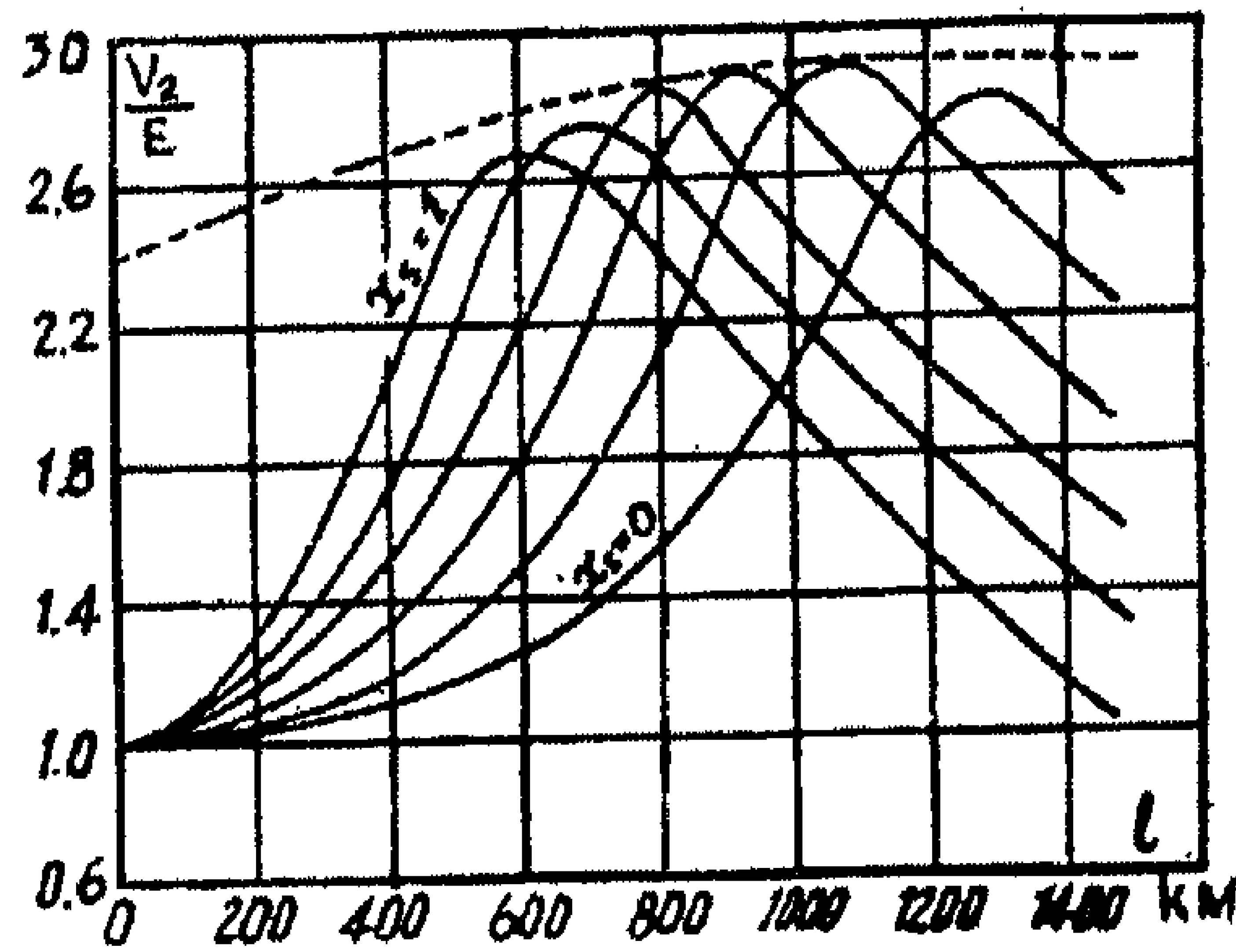
عندما $l < 1500$ km ، فإن الجهد عند بداية الخط يزداد مقارنة بـ ق.د.ك المؤثرة. وهذا يرجع إلى حقيقة أن التيار السعوي للخط، المار خلال المحاثة الموصلة قبل الخط، يسبب هبوط جهد يضاف إلى ق.د.ك للمصدر. الشرح الثاني هو أن محاثة المصدر، المضافة إلى محاثة الخط، تخفض تردد الذبذبات الطبيعية وتحضر النظام بالقرب من شروط الرنين.

شرط الرنين هو تساوي معاوقة دخل الخط مع المفاعلة الحثية. وبدون اعتبار الكورونا فإن ذلك يقابل الشرط:

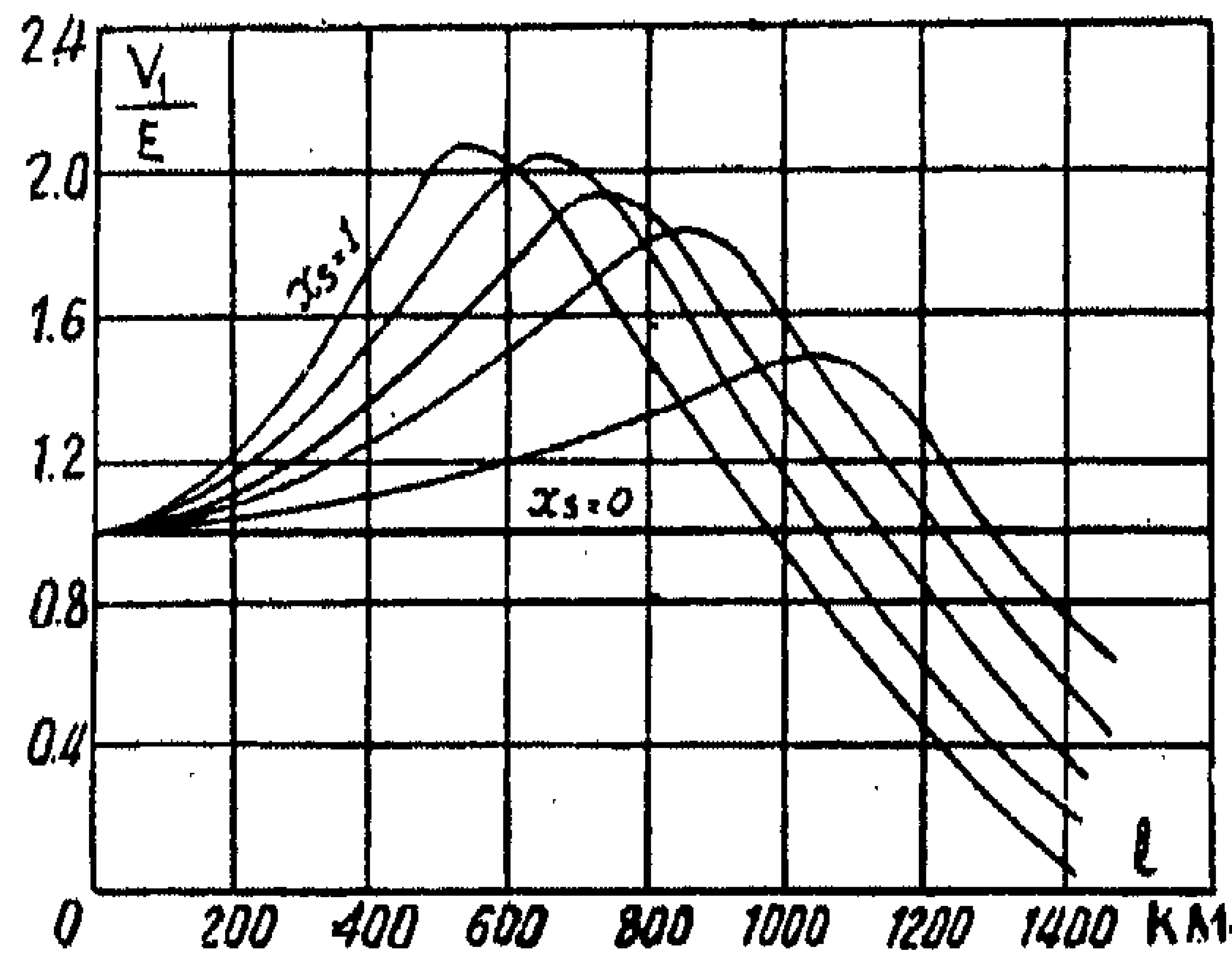
$$\cot\alpha l = \frac{\omega L_s}{Z} \qquad (31.14)$$

والذي يتحقق عند $\alpha l < \pi/2$ ، $l < 1500$ km ، طول الرنين، ينخفض مع الزيادة في المحاثة الموصلة قبل الخط.

قيمة المحاثة الموصلة قبل الخط تُحدد بواسطة قدرة المصدر. من المناسب تحديد $x_s = \omega L_s$ ، وأخذها كأساس لقيم تردد النظام، الجهد الاسمي وما يسمى السعة الطبيعية للخط $P_N = V_N^2/Z$. وعلى ذلك فإن معاوقة تموّر الخط Z ، ستخدم كالقيم الأساسية للمعاوقة. المفاعلة الموصلة قبل الخط مصنوعة من المفاعلة الانتقالية للمولدات [(30–35)%] ومفاعلة التسرب للمحولات. في المتوسط يمكن تقدير المفاعلة الموصلة قبل الخط عند قيمة في حدود $0.5Z$.



(a)



(b)

الشكل 14.29: منحنيات اعتماد الجهد عند بداية الخط V_1 وعند نهايته V_2 على الطول لقيم مختلفة من المفاعلة x_s الموصلة عند بداية الخط مع اعتبار الكورونا. مغلف أقصى الجهود المتحصل عليها بالحسابات موضحة بشُرَط.

اعتماد الجهد عند بداية الخط V_1 وعند نهايته V_2 كدالة في الطول لقيم مختلفة من المفاعلة x_s الموصلة قبل الخط معطاة في الشكل 14.29. تم الحصول على المنحنيات تجريبياً على نموذج الخط مع اعتبار الكورونا.

من المنحنيات نرى أنه بالتناسب مع زيادة x_s فإن طول الرنين يتناقص تدريجياً –وإلى جانب ذلك– يحدث أن يكون أقل من القيمة المتحصل عليها من المعادلة (14.31) بنسبة %(25–30) على أساس تأثير الكورونا. عند أطوال الخط km (400–800)، نلاحظ ارتفاعات محسوسة للجهد ليس فقط عند النهاية بل أيضاً عند البداية. ومع الزيادة في طول الخط فوق

800 km ، نلاحظ أن محاثة الدخل للخط تبدأ في التناقص وبسبب ذلك ينخفض الجهد عند بداية الخط، ويصل إلى قيم صغيرة جداً عند $l = 1500$ km .

النهاية العظمى لمنحنيات رنين الجهد عند نهاية الخط تتغير قليلاً أثناء تغير المحاثة الموصلة قبل الخط. طبيعة غلاف الجهود القصوى الموضح في الشكل 14.29(a) بخط مشرط هو برهان على ذلك.

وعلى أساس منحنيات الشكل 14.29 من الممكن رسم استنتاجين:

١. أقصى جهد عند نهاية خط مفتوح في نظام الحالة المستقرة يكون محدود بالكورونا لقيمة في حدود $3V_{ph}$.

٢. بالنسبة للمحاثات الكبيرة الموصلة قبل الخط [مصدر ذو سعة صغيرة] ونسبياً ليست أطوال كبيرة جداً، فإن الجهد عند بداية الخط يمكن أن يرتفع إلى قيمة تقترب من $2V_{ph}$. في هذه الشروط فإن قلب المحول الموصل عند بداية الخط سيكون في نظام ذات تشبع قوي جداً، يزداد تيار المغنطة بحدة ويمكن أن يبذل التفرع المغنطيسي للمحول تأثيراً ملموساً على قيمة الجهد-الزائد.

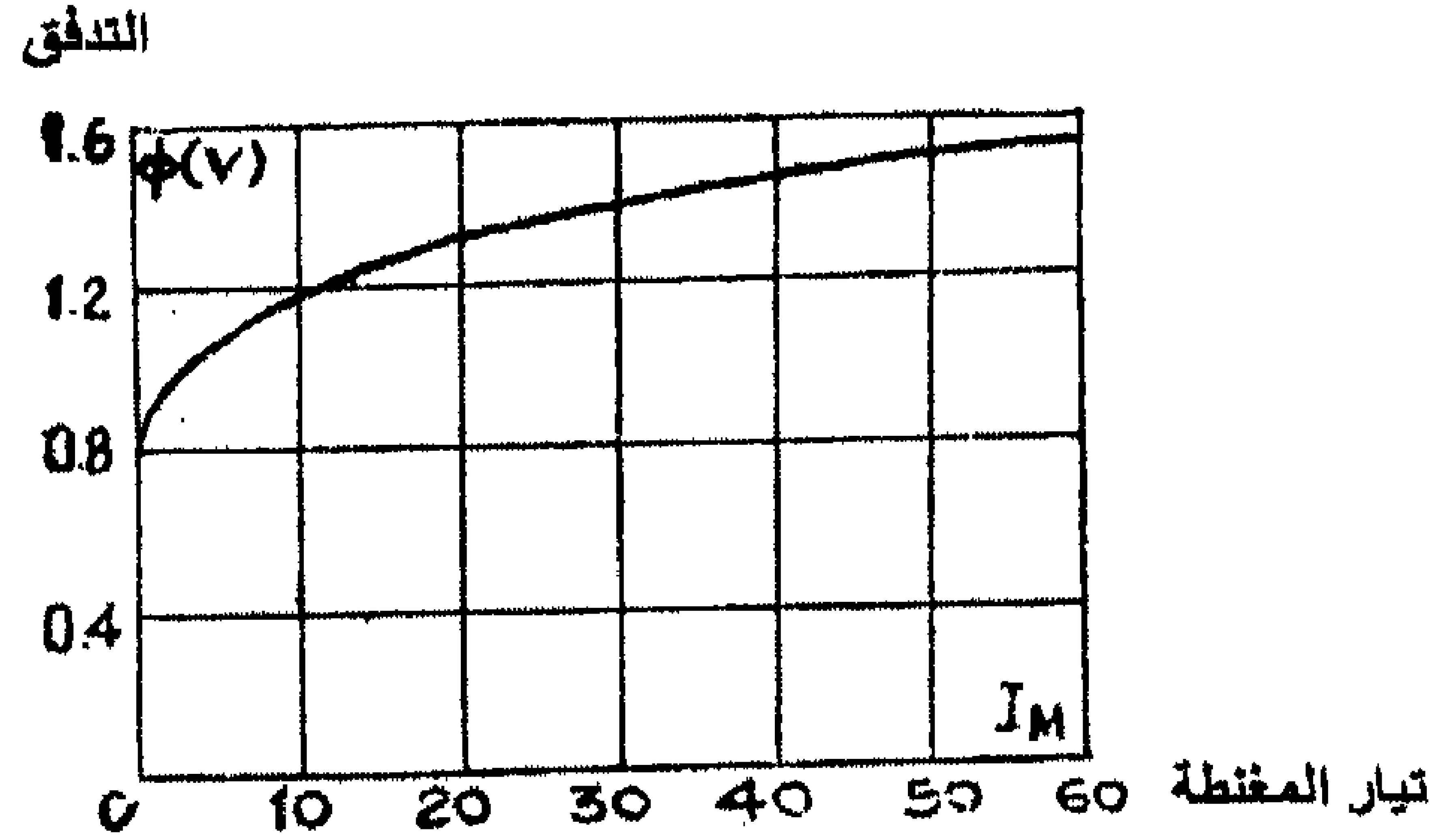
١٤-٤-٦ تأثير تيار مغنطة المحول [التفرع المغنطيسي] على الجهود الزائدة في النظام الأبسط

The Effect of the Magnetizing Current of the Transformer [Magnetic Shunt] on the Over-Voltage in the Simplest Scheme

عادة ما تعمل المحولات والمحولات-الذاتية (400–500) kV auto-transformer عند حث اعتباري عالي. يوضح الشكل 14.30 خصائص التمغنط النموذجية in per unit [تيار المغنطة والتدفق flux عند جهد اعتباري nominal أخذاً ككميات أساسية] وافترضنا أن الجهد على التفرع المغنطيسي magnetic shunt جيبي، يمكن اعتبار منحنى التمغنط كاعتماد ذروة الجهد على ذروة تيار المغنطة.

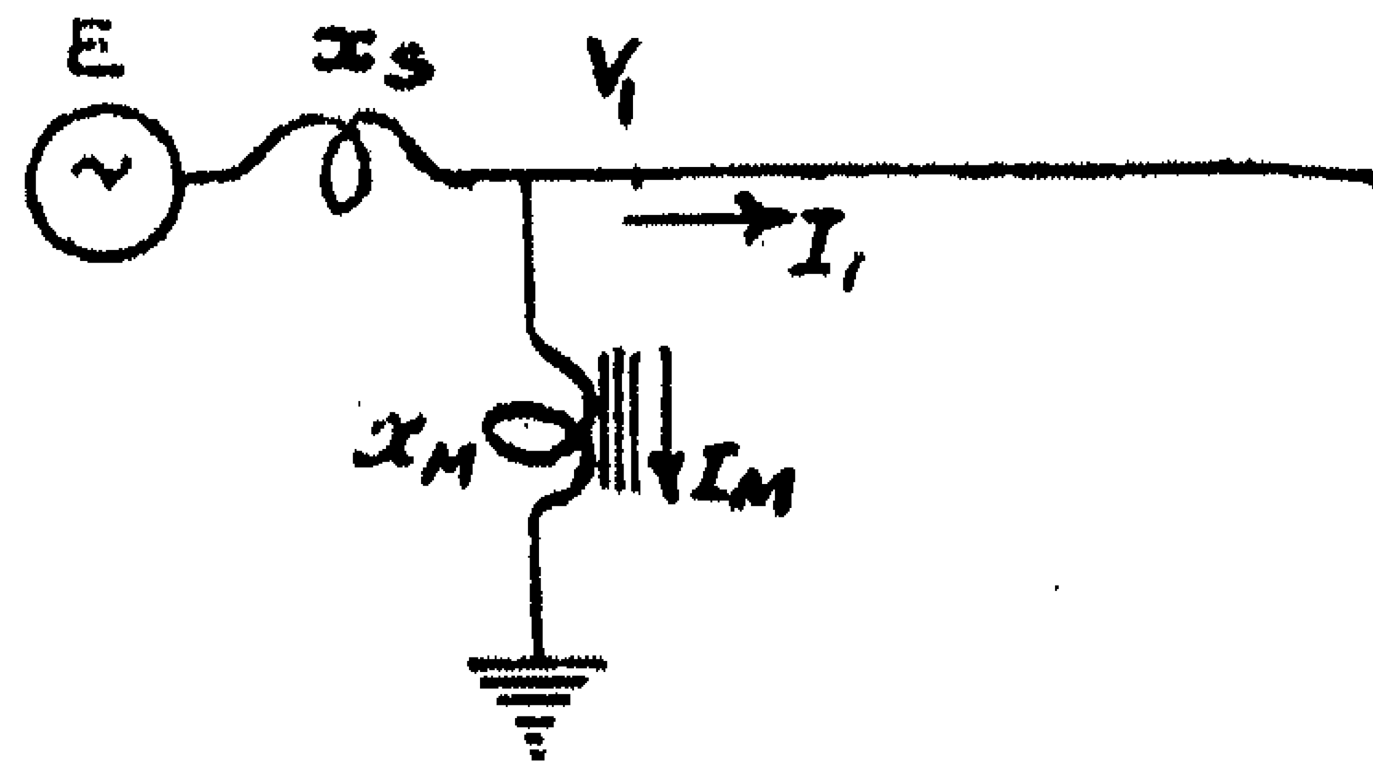
عند الجهد الاعتباري، يكون تيار التمغنط صغيراً جداً [(4–2)% من التيار الاعتباري للمحول] ولكنه يتغير بحدة كبيرة جداً مع الزيادة في الجهد، زيادة الجهد بـ 50% تؤدي إلى زيادة القيمة القصوى للتيار بعشرات المرات، أي أن التيار المغنط للمحول يحصل على نفس الدرجة مثل التيار الاعتباري للمحول. أثناء ذلك، فإن شكل منحنى التيار يُشوَّه كثيراً والتأثير النسبي للمركبات التوافقية العليا يزداد لذلك فإن ذروة التوافق الأساسي تشكل (80–50)% من قيمتها القصوى. أثناء المرور خلال المحاثة الموصلة قبل الخط، يسبب التيار المغنط غير-

الجيبي هبوط جهد غير–جيبي، وبالتالي، فعند بداية الخط وعند نقط أخرى تظهر التوافقيات العليا. ارتفاعات الجهد تكون مشروطة ليس فقط بالتوافقية الأساسية بل أيضاً بتراكب التوافقيات العليا عليها.



الشكل 14.30: خصائص التمغنط النموذجية لمحول

ولكي نعرض بيانياً وتقريبياً شكل تأثير المحول، سنعتبر هذه الظاهرة بشكل منفصل، أي أننا سنعتبر أولاً أن الجهود المرتفعة تتسبب بالتوافق الأساسي وبعد ذلك سنبحث تأثير التوافقيات الأعلى.



الشكل 14.31: مخطط مبسط لتحديد تأثير التفرع المغنطيسي لمحول

مع نظرة لتخفيض عدد البارامترات في نظام الحسابات، سنحول التفرع المغنطيسي للمحول عند بداية الخط [الشكل 14.31]، أي بدلاً من الدائرة المكافئة طراز– T، سنستغل الدائرة المكافئة طراز–Γ للمحول. كل الحسابات المبسطة المعطاة بأسفل يمكن أن –بدون أي صعوبات عملية– تنفذ للدائرة المكافئة طراز– T أيضاً، ومع ذلك فإن تحول التفرع المغنطيسي عند بداية الخط ينقذنا من الحسابات الزائدة والمفرطة ويجعل الحسابات بيانية أكثر.

للحصول على أفكار كمية بسيطة، تُستخدم أحياناً العلاقات التحليلية التقريبية لخصائص الفولت–أمبير للمحول:

$$I_{M_1} = \frac{I_{OC}\%}{100} P_T \, mV^{\,n} = kV^{\,n} \tag{32.14}$$

حيث n = عدد فردي، عادة 7، 9، أو 11 .

$I_{OC}\%$ = تيار التمغنط بـ per unit من التيار الاعتباري للمحول [يقع عادة في حدود (2–4)%، القيمة الأقل تكون للمحولات الأكبر].

P_T = مقنن المحول per unit.

m = النسبة المتوسطة من التوافق الأساسي إلى ذروة تيار التمغنط في منطقة التشبع العالي، تساوي (0.7÷0.5) تقريباً.

تأثير التفرع المغنطيسي على ارتفاع الجهد للتردد الأساسي

Effect of the Magnetic Shunt on the Voltage Rise of Fundamental Frequency

يرتبط الجهد عند بداية الخط بـ ق.د.ك للمصدر بالعلاقة التالية:

$$E = \dot{V}_1 + \left(\dot{I}_1 + \dot{I}_{M_1}\right) j\, x_s \tag{33.14}$$

حيث $\dot{I}_1$ = التيار عند بداية الخط.

$\dot{I}_{M_1}$ = قيمة التوافق الأساسي لتيار تمغنط المحول.

تيار التمغنط يكون حثي والتيار عند بداية الخط يكون سعوي في الطبيعة $(l < 1500\ \text{km})$ ولذلك في غياب المفقودات الفعالة يكونوا في تضاد طور. إذن:

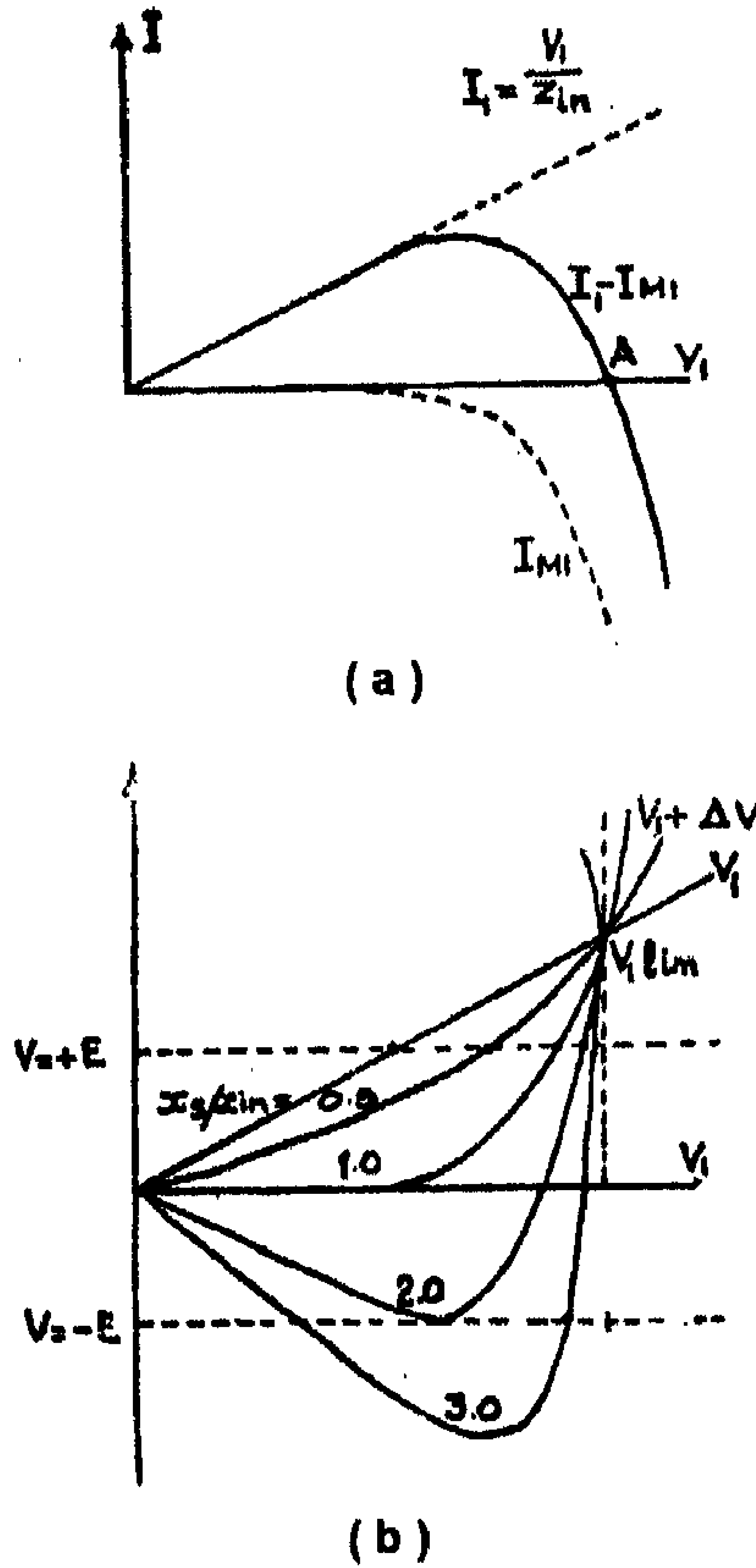
$$E = V_1 - \left(I_1 - I_{M_1}\right) x_s$$

أو

$$E = V_1 - V_1 \frac{x_s}{Z_{in}} + I_{M_1} x_s \tag{34.14}$$

يوضح الشكل 14.32(a) منحنيات الاعتماد على الجهد عند نهاية الخط لتيار سعوي من الخط I_1 تيار مغنطة I_{M_1} والتيار خلال المحاثة الموصلة قبل الخط $\left(I_1 - I_{M_1}\right)$. من هذا الرسم، نرى أنه عند جهود تتعدى الجهد الاعتباري، يصبح تيار التمغنط مقارن مع التيار السعوي للخط والتيار خلال المحاثة الموصلة قبل الخط ينخفض. عند النقطة A يتحقق تساوي

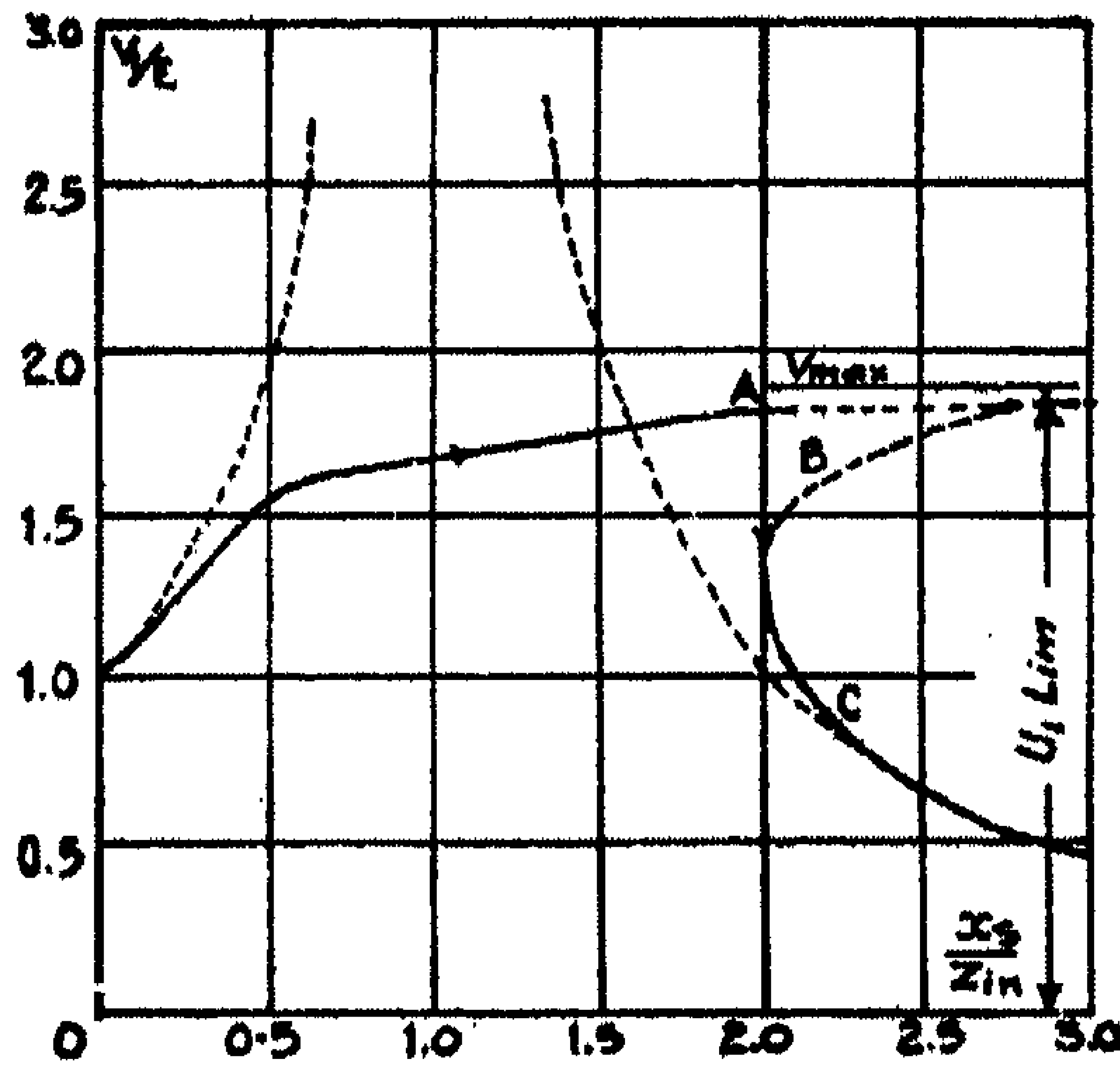
التيار السعوي للخط وتيار التمغنط أي أن التيار خلال المحاثة الموصلة قبل الخط يصبح مساوياً للصفر. ومع المزيد من زيادة الجهد يمكن يتسبب في تغيير طور التيار بـ 180°، أي أن التيار يكون قد حصل على صفة حثية. ومع ذلك، فإن مثل هذا النظام لا يحدث عملياً.



الشكل 14.32: التحديد البياني لجهد التردد الأساسي عند بداية خط مع اعتبار التفرع المغنطيسي للمحول. (a) منحنى التيار عند بداية الخط، في التفرع المغنطيسي، والتيار المحصل $\left[I_1 - I_{M_1}\right]$؛ (b) التحديد البياني للجهد لقيم مختلفة من المحاثة $\left[x_s/Z_{in}\right]$ الموصلة عند بداية الخط

انخفاض التيار خلال المحاثة الموصلة قبل الخط يكون عاملاً مفضلاً بسبب تخفيض في الجهد عند بداية الخط، قيمته يمكن إيجادها بواسطة الحل البياني للمعادلة (14.34) مع اعتبار العلاقة $I_{M_1} = f(V_1)$. الجانب الأيمن لهذه المعادلة لقيم مختلفة من x_s، أي مجموع V_1، ΔV_1 يساوي $x_s(I_1 - I_M)$ وهو مرسوم في الشكل 14.32(b). تقاطع هذه المنحنيات مع

الخط الأفقي المرسوم عند مستوى ق.د.ك للمصدر تحدد قيمة V_1 لقيم مختلفة من x_s. من هذه النتائج تتكون العلاقة بين V_1، x_s [الشكل 14.33] على هيئة منحنى، هذا المنحنى يكون نموذجياً للرنين غير-الخطي ويكون مشابهاً لمنحنيات الكنتورات التذبذبية البسيطة التي تحتوي سعة ومحاثة غير-خطية [الشكل 14.17]. ولقيمة كبيرة من x_s [أو Z_{in} صغيرة، أي أطوال كبيرة من الخط] يمكن تواجد ثلاثة أنظمة مميزة للرنين في الدوائر غير الخطية هي A، B، C. الفرع A يميز بحقيقة أن الجهد V_1، ق.د.ك المؤثرة ينطبقان في الطور، والتيار يتقدم على ق.د.ك بـ 90°، أي أن معاوقة الدائرة تكون سعوية في الطبيعة، والجهد عند بداية الخط يكون في طور معاكس لـ ق.د.ك. الفرع B يكون غير مستقر. الفرع A يكون مستقر نظرياً، ولكن يمكن الحصول عليه فقط عند مفقودات صغيرة. وحيث إن المفقودات تزداد بحدة أثناء التشبع القوي للتفرع المغنطيسي ويحد التيار. النظام C من المحتمل جداً حدوثه عملياً ويتميز بجهود صغيرة نسبياً، التفرع المغنطيسي ليس له أي تأثير عملياً في هذا النظام. شكل المنحنى $V_1 = f(x_s)$ المتحصل عليه في التجارب على النماذج موضح بالأسهم.



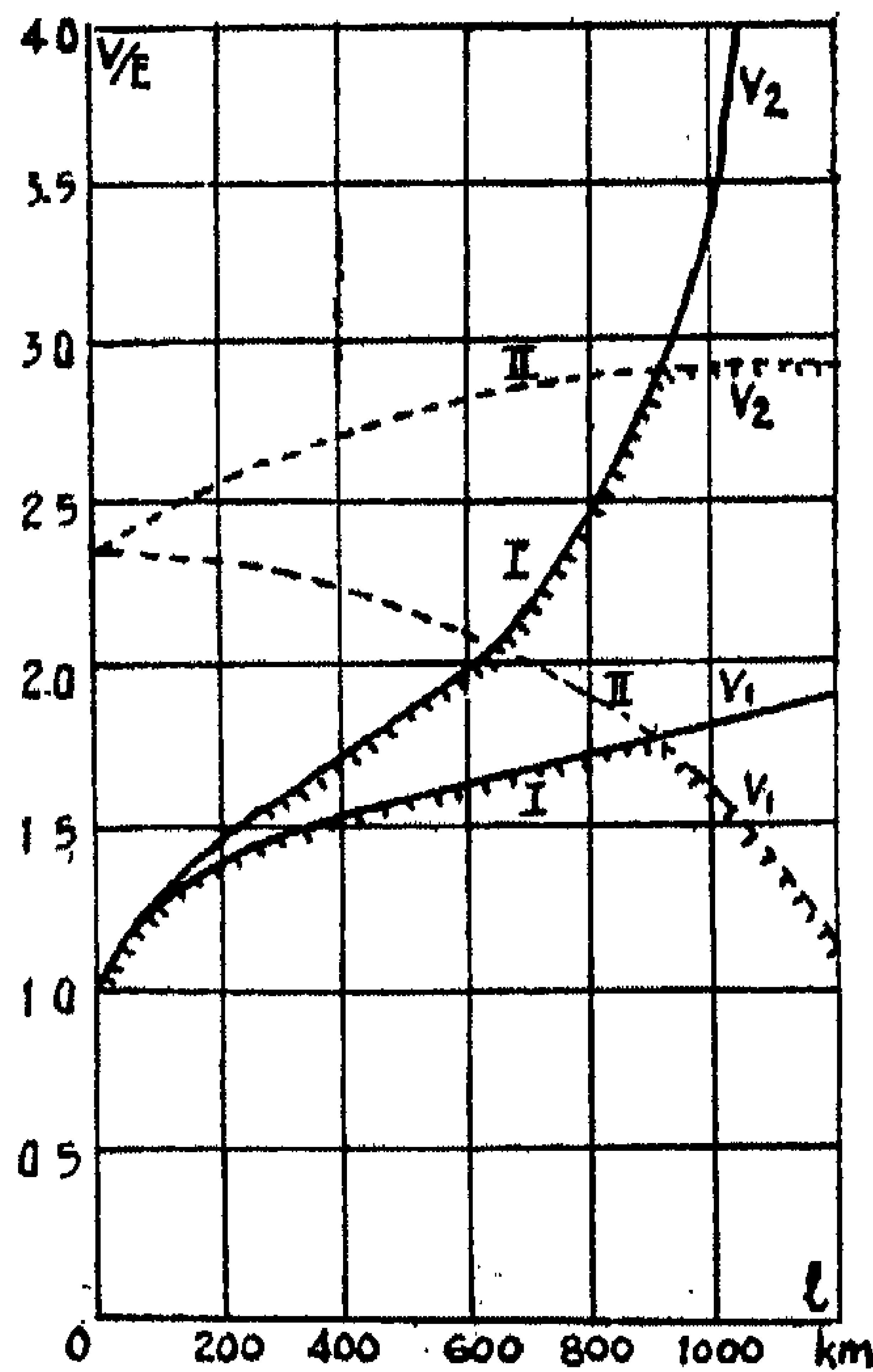
الشكل 14.33 : اعتماد الجهد عند بداية الخط على المفاعلة الحثية الموصلة عند بداية الخط. الاعتماد المقابل في غياب التفرع المغنطيسي موضح بالشَرْط

كما هو واضح في الشكل 14.33، يخفض التفرع المغنطيسي بحدة الجهد الأقصى عند بداية الخط وينقل نقطة الأقصى على الجانب ذات x_s الكبيرة [أو R_{in} الصغيرة أي طول كبير].

من الممكن تقدير الجهد الأقصى عند بداية الخط في وجود محول بتقريب شديد، إذا

اعتبرنا أنه في غياب المفقودات وأثناء الزيادة غير المحددة في x_s/Z_{in} فإن هذا الجهد يميل إلى القيمة المحددة $(V_1)_{lim}$ [الشكل 14.32] والتي تحدد بتساوي التيار في الخط $I_1=V_1/Z_{in}$ وتيار مغنطة المحول $I_{M_1}=KV_1^n$. وهكذا فإن الجهد عند بداية الخط لا يتعدى القيمة:

$$(V_1)_{lim} = \sqrt[n-1]{\frac{1}{K\,Z_{in}}} \qquad (35.14)$$



الشكل 14.34: منحنيات اعتماد الجهود القصوى الممكنة في النظام الأبسط على طول الخط. (I) مع اعتبار التفرع المغنطيسي فقط؛ (II) مع اعتبار الكورونا وحدها. المنحنى المحصل مع اعتبار كلا العاملين موضح مظلل

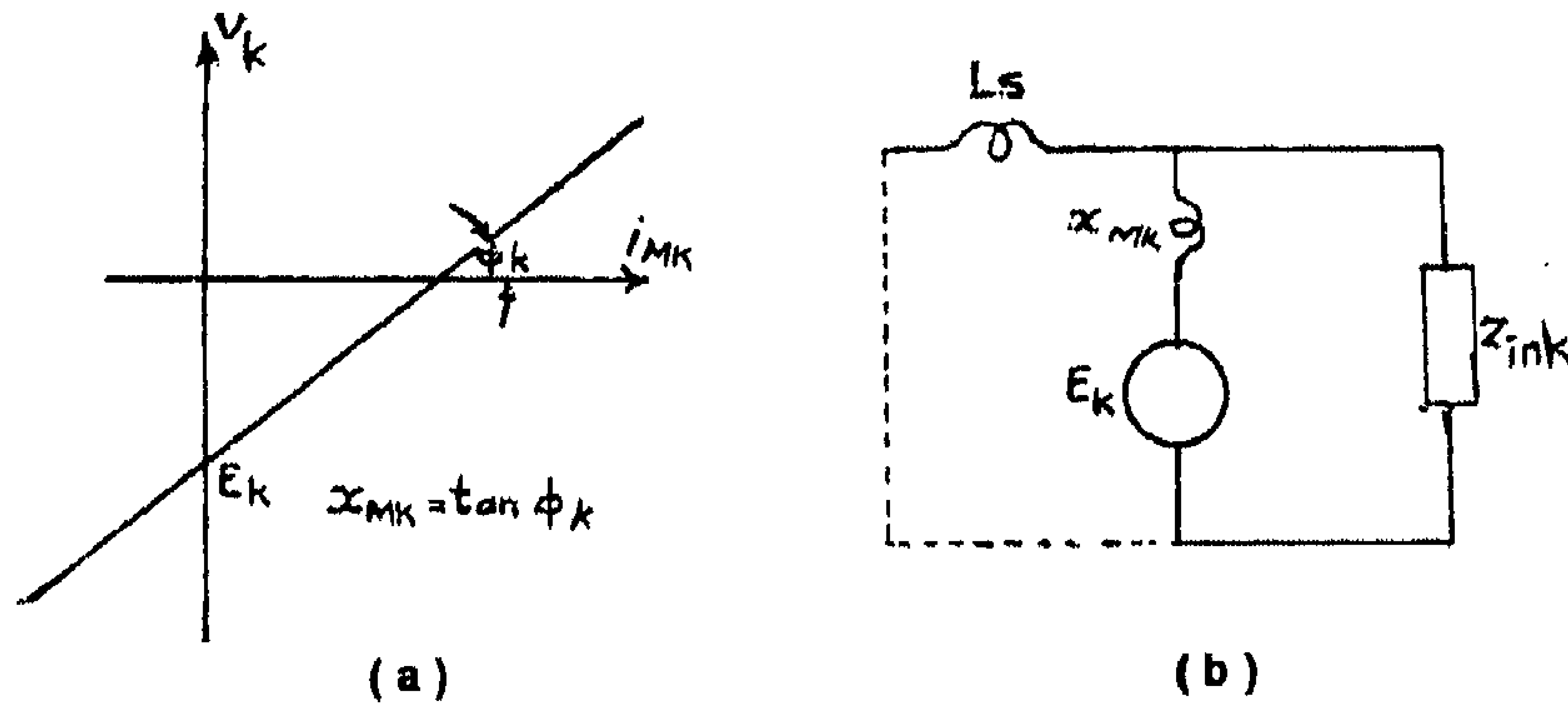
وعلى أساس هذا التقدير التقريبي فإن المنحنيات I للجهود القصوى عند بداية ونهاية الخط كدالة في طوله تنشأ في الشكل 14.34. ويحدث أن تكون هذه المنحنيات هي أغلفة envelopes للجهود القصوى للخط مع تفرع مغنطيسي. من الرسم نرى أن التفرع المغنطيسي يحد بفعالية من الجهد عند بداية الخط ولكن عند الأطوال الكبيرة يمكن أن يرتفع الجهد عند نهاية الخط بشكل ملحوظ. أغلفة الجهود القصوى عند بداية ونهاية الخط مع اعتبار الكورونا

[المنحنيات II] تنشأ أيضاً. ويتقاطع المنحنيان عند النقطة المقابلة لطول 900 km . وهذا يعني أنه بالنسبة لـ $l < 900$ km ، فإن تأثير الكورونا يلعب الدور الرئيسي في تقييد الجهود-الزائدة وبالنسبة لـ $l > 900$ km فإن الخصائص غير الخطية للتفرع shunt ذات أهمية رئيسية.

من المنحنيات نرى أنه حتى في وجود التفرع المغنطيسي، فإن الجهود-الزائدة القصوى عند نهاية الخط يمكن أن تصل إلى قيم قريبة من $3V_{ph}$ ولكن مثل هذه الجهود-الزائدة المقيدة بغض النظر عن قيمة المحاثة الموصلة قبل الخط يمكن أن تحدث فقط لأطوال خط أكبر من 900 km .

ارتفاع الجهد الناشئ من توافقيات أعلى Voltage Rise Caused by Higher Harmonics

تيار التمغنط غير الجيبي للمحول المار خلال المحاثة الموصلة قبل الخط يسبب تشوه في شكل منحنى الجهد، عامة بعض التوافقيات فيه يكون لها تأثيراً سائداً. أثناء ذلك فإن منحنى التدفق المغنطيسي يحصل على تشوه أقل كثيراً، حيث إن ذروة التوافق kth للجهد ووصلة التدفق يكونا متصلين فيما بينهما بالعلاقة $\phi_k = V_k / k\,\omega$. إذا -مثلاً- في منحنى الجهد شكلت التوافقية الخامسة 25% من الأساسية، ففي منحنى التدفق ستشكل 5% فقط. لذلك، يمكن أن نعتبر أن ظهور التوافقيات الأعلى لا يؤثر على مركبات التردد الأساسي في التيار والجهد.



الشكل 14.35: مخطط لحساب التوافقيات العليا للجهد. (a) خصائص الفولت-أمبير $V_k = f\,(i_{Mk})$ للتوافقية الخامسة؛ (b) الدائرة المكافئة

مع جهد جيبي يحتوي على تيار تمغنط المحول عدد من التوافقيات الفردية. منحنى الجهد يشوه بسبب بعض التوافقيات العليا، توافقيات التيار المقابلة تزداد أو تنقص اعتماداً على إشارة توافق الجهد بالنسبة للأساسي. فمثلاً، طبيعة الاعتماد بين جهد وتيار التوافقية الخامسة [بدون اعتبار المفقودات الفعالة] موضح في الشكل 14.35(a). نقطة التقاطع مع المحور

السيني تقابل الجهد الجيبي $V_k = V_5 = 0$. من الرسم نرى أن وجود المركبة التوافقية ذات الإشارة المعاكسة بالنسبة للأساسية تخفض التيار –خصوصاً– عند قيمة محدودة من هذا التوافق يمكن أن تؤول إلى الصفر.

على أساس الشكل 14.35، فإن الدائرة المكافئة للتفرع المغنطيسي كمولد ذات توافقية عالية معطاة في الشكل (b)14.35. ق.د.ك لهذا المولد تساوي جهد التوافقية kth التي عندها يصبح التيار i_{M_k} صفراً. حيث إن العلاقة بين التيار وجهد التوافقية kth تكون قريبة من الخط المستقيم، فإن المفاعلة الداخلية x_{Mk} تحدد بواسطة ظل زاوية ميل الخط المستقيم على المحور السيني $tan\,\phi_k$. الدائرة الداخلية موضحة أيضاً في الشكل (b)14.35، مصدر الجهد للتردد التجاري موضح مقصر–الدائرة، حيث إن ق.د.ك له لا تحتوي على توافقيات أعلى. معاوقة الدائرة الخارجية Z_k للتوافقية kth تتشكل بالتوصيل المتوازي للمفاعلة الحثية $k\,\omega L_s = k\,x_s$، ومعاوقة الدخل للخط:

$$\dot{Z}_k = \frac{j\,k\,\omega L_s\,Z_{in_k}}{j\,k\,\omega L_s + Z_{in_k}} \qquad (36.14)$$

هذه المعاوقة Z_k يمكن أن يكون لها كل من الاعتماد السعوي والحثي على طول الخط وقيمة المحاثة الموصلة قبل الخط. إذا لم تؤخذ المركبة الفعالة في الاعتبار، $Z_k = \pm j\,x_k$. مركبة الجهد عند أطراف التفرع المغنطيسي تكون مساوية للآتي:

$$V_k \cong E_k \frac{\pm j\,x_k}{j\,x_{M_k} \pm j\,x_k} = \pm E_k \frac{x_k}{x_{M_k} \pm x_k} \qquad (37.14)$$

المركبة التوافقية V_k تحصل على أقصى قيمة في حالة أن يصبح مقام المعادلة (14.37) صفراً. أي أن مقاومة دخل الدائرة بالنسبة لنقطة اتصال التفرع تكون سعوية الطبيعة وتساوي في المقدار المعاوقة الداخلية للمولد المكافئ. ذروة هذه المركبة تكون محددة بالمفقودات التي لم تؤخذ في الاعتبار في المعادلة (14.37).

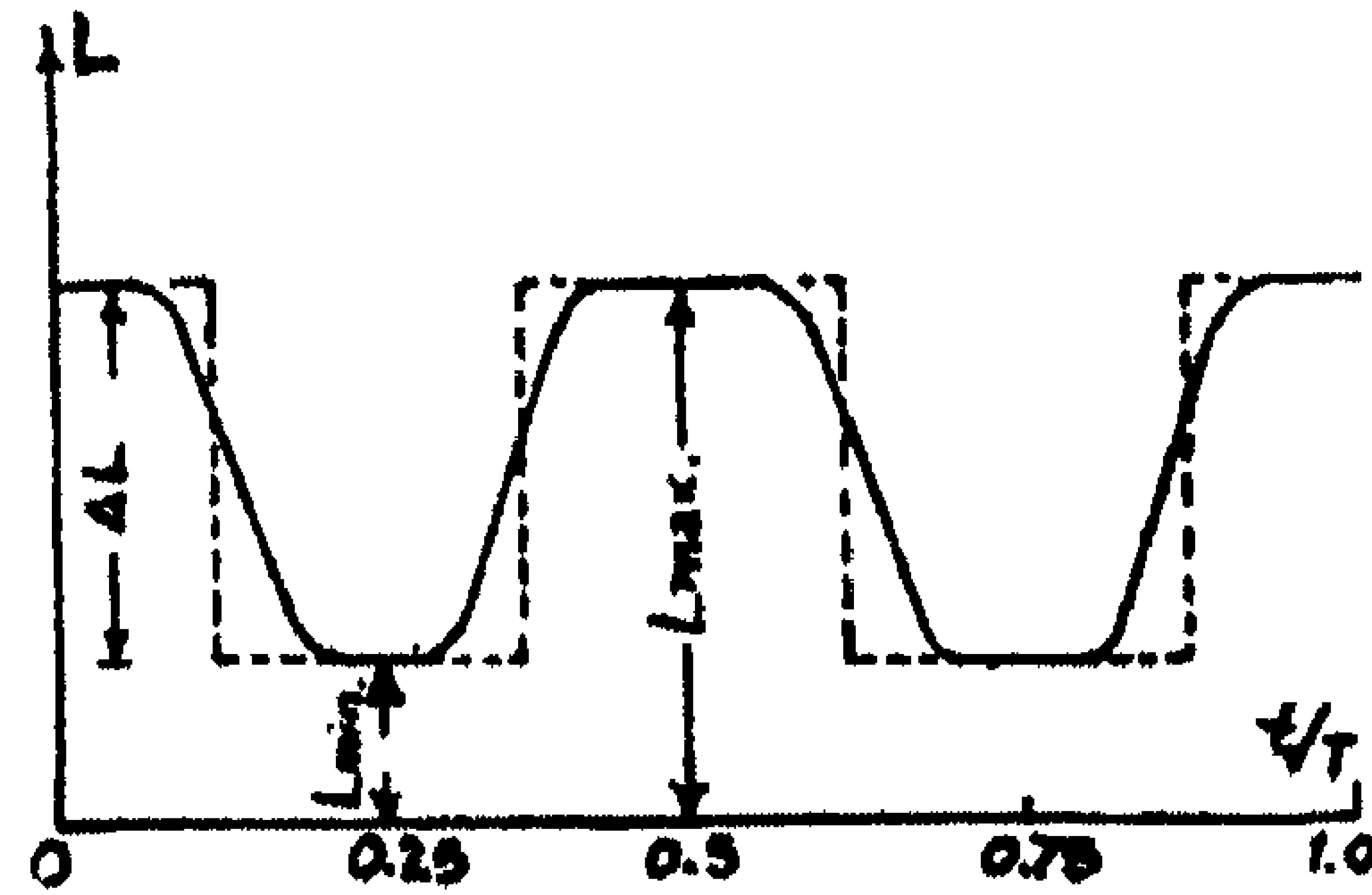
من الضروري أن نُمْعن النظر في إمكانية ظهور التوافقية الثالثة والتي تسري عبر بارامترات التتابع صفر. معاوقة تموّر الخط للتوافقية الثالثة يكون ضعف الأساسية تقريباً. ويزداد الطول الموجي للخط مقارنة بالطول الموجي للتوافقية الأساسية ليس بـ 3، بل تقريباً بـ (4.5–4) مرة. لذلك، فإن ربع موجة من التوافقية الثالثة تقابل ليس $1500/3 = 500$ km بل حوالي 330 km محاثة المصدر للتوافقية الثالثة تختلف كثيراً أيضاً عن محاثة التوافقيات التي ليست

مضاعفات 3، حيث المحولات لها لفات جهد منخفض موصلة في دلتا والتي تسري فيها التوافقية الثالثة للتيار. المحاثة L_s للدائرة المكافئة للتوافقية الثالثة تكون عادة %(20–10) من محاثة التوافقية الأساسية، أي أن معاوقة الدخل للتوافقية الثالثة بالنسبة لنقطة توصيل التفرع المغنطيسي يكون دائماً صغيراً جداً والذي يسبب قيمة منخفضة من التوافقية الثالثة في الجهد.

ويمكن حدوث الرنين مع التوافقية الثالثة في منطقة ضيقة جداً فقط عندما يكون الطول الموجي للخط للتوافقية الثالثة قريباً من $\frac{\pi}{2}$ [أو $\frac{3}{2}\frac{\pi}{2}$، $\frac{5}{2}\pi$، ...إلخ].

ارتفاع الجهد بسبب التوافقية الثالثة يمكن أن يحدث في الأنظمة غير المتماثلة [مثلاً، دائرة قصر طور واحد لخط مفتوح مع الأرضي]، عندما تشكل متجهات الجهد للتردد الأساسي زاوية تختلف عن 120°، والتوافقيات المرتبطة معهم والتي تكون مضاعفات ثلاثة لا تتفق في الطور، أي أنها تحتوي على مركبات تتابع موجب.

ظاهرة إثارة التوافقيات الزوجية تعتبر ذات أهمية كبيرة. التفرع المغنطيسي للمحول يكون مصدر إنتاج توافقيات زوجية. ومع ذلك، فإن آلية إنتاج توافقيات زوجية تختلف من حيث المبدأ عن آلية إنتاج التوافقيات الفردية.

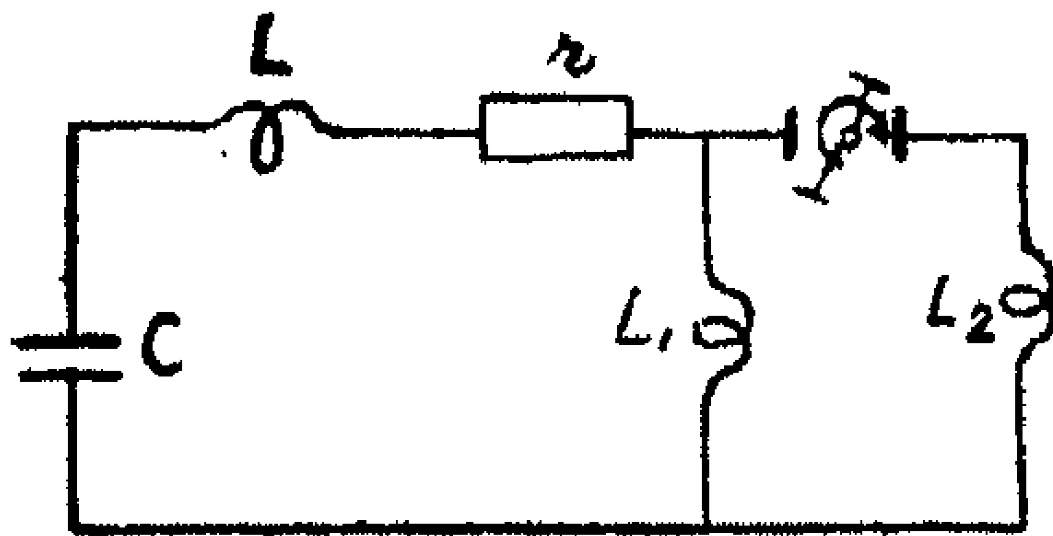


الشكل 14.36: الاعتماد الطبيعي لمحاثة التفرع المغنطيسي على الزمن [T= فترة جهد المصدر]. تغير المحاثة معطى بمخطط الشكل 14.37

بسبب تماثل خصائص التمغنط فإن التوافقيات الزوجية لا تتواجد في تيار التمغنط في حالة تماثل منحنى الجهد، السبب في ظهور التوافقية الثانية –يكون– بالتالي ليس التركيب التوافقي لتيار التمغنط، بل خاصية مختلفة للتفرع المغنطيسي –وهي بالتحديد– التغير المستمر لمحاثتها بالارتباط مع تغير الجهد المؤثر والتشبع في الصلب. ($L_M = d\phi/dt$) وحيث إن منحنى التمغنط لا يعتمد على اتجاه التيار فإن محاثة الملف تتغير مع التردد المزدوج فيما يتعلق بالجهد

المؤثر [الشكل 14.36]. في هذه الحالة فإن حدوث ما يسمى "الرنين البارامتري-الذاتي" auto parametric resonance يكون ممكناً. ومن الممكن شرح هذه الظاهرة في شكل مبسط بالأسلوب التالي: دعنا نفترض أنه في الدائرة التي تحتوي على C، L، r الذبذبات الطبيعية، التي ستخمد في تتابع وجود المفقودات الفعالة في الدائرة، تُنْتَج نتيجة لبعض التوحيد commutation. ولكن إذا كان التوحيد المسبب لهذه الذبذبات يكرر بانتظام بعد فترات صغيرة متساوية من الزمن والتي تكون مضاعفات فترة الذبذبات الطبيعية، فإن الذبذبات ستحصل على صفة مستقرة. وعلى وجه الخصوص، إذا حدث التوحيد بعد كل نصف دورة، فإن تخميد الذبذبات لن يُكتشف. التوحيد في الحالة المعطاة لا يعني بالضرورة غلق وفتح مفاتيح الدائرة، وبالمثل يمكن أن يكون تشغيل يُسبب تغير في بارامترات أحد عناصر الدائرة قادر على تخزين طاقة-سعات أو محاثات [من هنا جاء اسم "رنين بارامتري"].

وكمثال، دائرة معطاة في الشكل 14.37 وفيها أحد المحاثات الخطية وفيها أحد المحاثات الخطية تغلق وتفتح بواسطة موحد متزامن مع ضعف ترددية [دورية] تردد الذبذبات الطبيعية لذلك فإن المحاثة في الفرع المتوازي تتغير مع الخط المشرط في الشكل 14.26. الطاقة الكهرومغنطيسية المتحررة أثناء تقطع الدائرة الحثية تعوض المفقودات الفعالة وتحفظ الذبذبات غير المخمدة في الدائرة. صفة وجوهر العملية لا يتغيران، أي أنه ليس كنتيجة التوحيد. ولكن بأسلوب آخر -مثلاً- بطريقة التغير الدوري لتشبع القلب كما يحدث في محول [في الحالة السابقة كان لدينا شيء مخالف من الرنين البارامتري-الرنين البارامتري الذاتي].

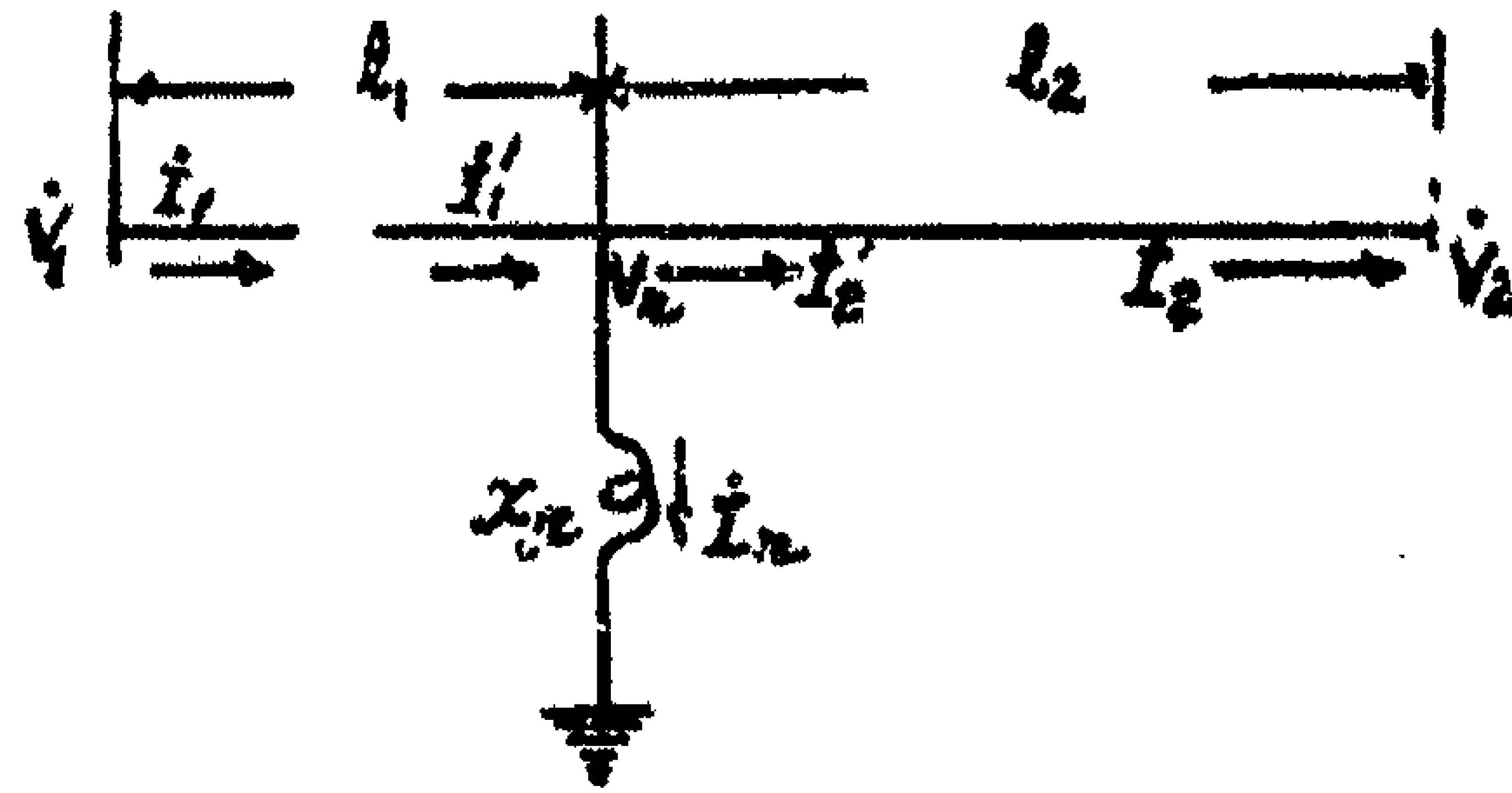


الشكل 14.37 : مخطط يكون فيه ظهور الرنين البارامتري ممكناً

١٤-٤-٧ تأثير مفاعلات تعويض التفرع على الجهود-الزائدة المستقرة

Effect of Shunt Compensating Reactors on Steady-State Over-Voltages

تركيب مفاعلات reactors عند نقط قليلة من خط نقل طويل المسافة يكون جوهرياً لضمان أنظمة عادية للنقل. بالإضافة إلى ذلك، بواسطة التعويض الجزئي فإن التيار السعوي للخط، والمفاعلات تعمل على إنجاح تقييد الجهود-الزائدة في معظم الحالات. في أي حالة فإنها تخفض جهد التردد الأساسي.



الشكل 14.38: مخطط مع مفاعل عند نقطة متوسطة من خط

مع تركيب مفاعل عند أي نقطة من خط طوله l ، يمكن الحصول على الجهد على الخط عند مسافات l_1 ، l_2 من نهايتيه، إذا حللنا معادلات القطاعات l_1 ، l_2 آنياً. باستغلال مصطلحات الشكل 14.38 وإهمال المفقودات الفعالة $(\beta = 0, \gamma l = j\,\alpha l)$ ، سنحصل على المعادلات الآتية:

للقطاع l_2 $(I_2 = 0)$:

$$\dot{V}_r = \dot{V}_2 \cos \alpha l_2$$
$$\dot{I}_2' = j \frac{\dot{V}_2}{Z} \sin \alpha l_2 \tag{38.14}$$

للقطاع l_1 :

$$\left.\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_r \cos \alpha l_1 + j\, \dot{I}_1' Z \sin \alpha l_1 \\ \dot{I}_1 &= j \frac{\dot{V}_r}{Z} \sin \alpha l_1 + \dot{I}_1' \cos \alpha l_1 \end{aligned}\right\} \tag{39.14}$$

وعلاوة على ذلك، بالنسبة للنقطة التي عندها يكون المفاعل موصلاً تتحقق المعادلة التالية:

$$\dot{I}_1' = \dot{I}_2' + \dot{I}_r = \dot{I}_2' + \frac{\dot{V}_r}{j\, x_r} \tag{40.14}$$

حيث $x_r =$ مفاعلة المفاعل reactance of the reactor.

وبحل هذه الخمس معادلات آنياً بعد تحويلات بسيطة سنحصل على:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos \alpha l + \sin \alpha l_1 \cos \dfrac{\alpha l_2}{q_L}} \tag{41.14}$$

حيث $q_L =$ القدرة الإجمالية للمفاعل per unit:

$$q_L = \frac{Q_r}{P_{NT}} = \frac{x_r}{Z}$$

وبإيجاد التيار I_1 عند بداية الخط، يكون ممكناً بالمثل إيجاد معاوقة الدخل التي تساوي:

$$Z_{in} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = -j\, Z \frac{\cos \alpha l + \sin \alpha l_1 \cos \alpha l_2 / q_L}{\sin \alpha l - \cos \alpha l_1 \cos \alpha l_2 / q_L} \qquad (42.14)$$

وبالحصول على هذه العلاقات لخطوط طولها $l < 900$ km ، حيث الجهود الزائدة تكون مقيدة بواسطة التفرع المغنطيسي للمحول، ليس صعباً أن نجد القيم الأكبر المكنة للجهود- الزائدة عند نهاية الخط للقيمة غير المرغوبة من المحاثة الموصلة قبل الخط. ولهذا، تحدد قيمة $(V_1)_{lim}$ بمساعدة القيمة Z_{in} المسحوبة من المعادلة (14.35)، والتي بعدها يمكن إيجاد القيمة النهائية للجهد عند نهاية الخط من المعادلة (14.41). نتائج هذه الحسابات لخطوط الأطوال 900 km، 600 km معطاة في الشكل (a)14.39، (b)14.39. عند طول خط $l > 900$ km يكون أساسياً اعتبار تأثير الكورونا.

١٤-٤-٨ الجهود الزائدة في خطوط النقل طويلة المسافة في وجود تعويض سعوي توالي

Over-Voltages in the Long Distance Transmission in the Presence of Series Capacitive Compensation

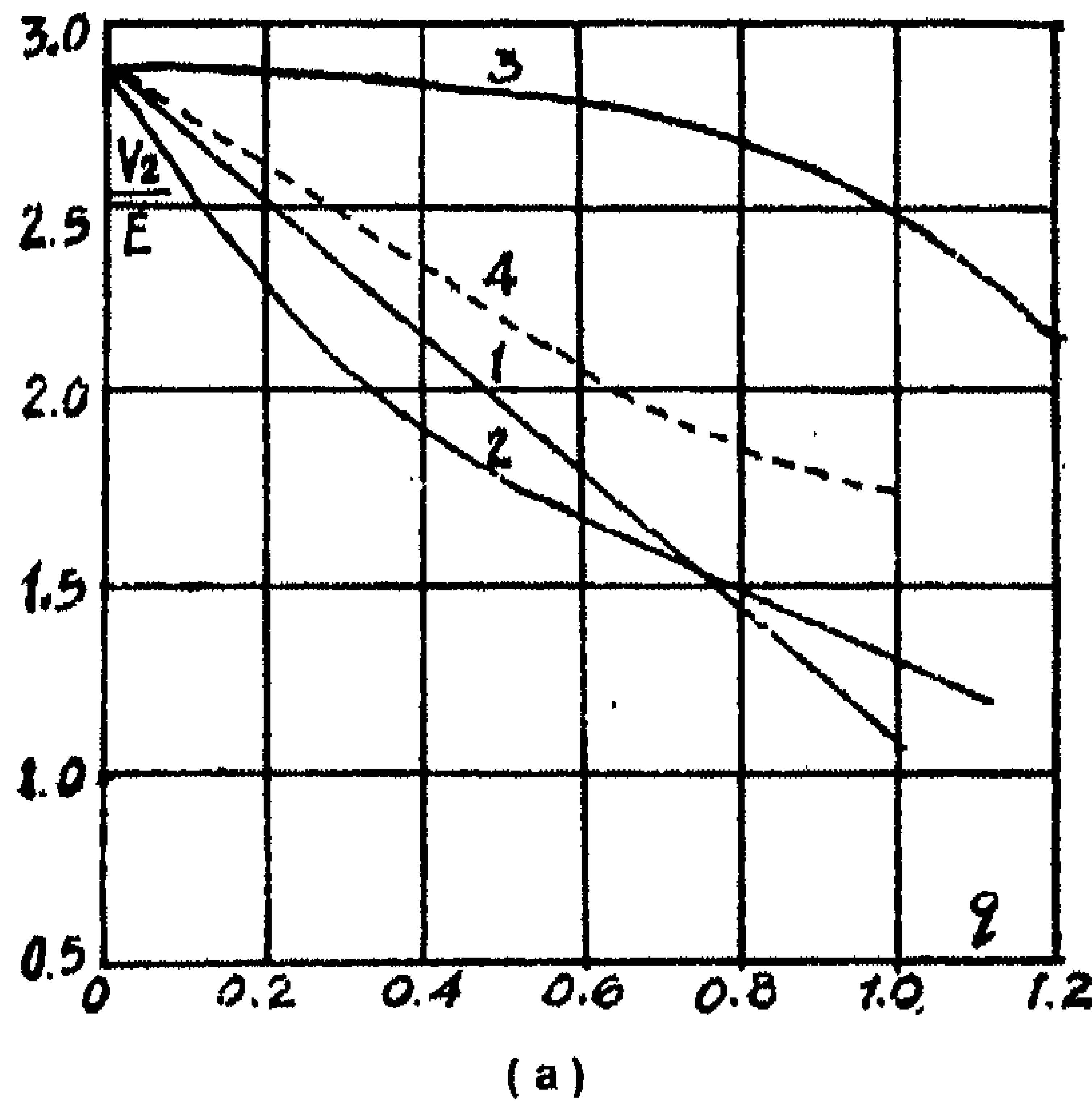
مع تركيب مكثف ذو تعويض سعوي عند أي نقطة من الخط [الشكل 14.40] فإن الجهود على الخط يمكن تقديرها بنفس الطريقة التي نفذت بها بالنسبة للمفاعلات في البند السابق. إذا كانت نسبة المفاعلة السعوية لمجموعة المكثفات إلى معاوقة تمور الخط يرمز لها بـ q_C ($q_C = x_C / Z$)، عندئذ نحصل على:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos \alpha l + q_C \sin \alpha l_2 \cos \alpha l_1} \qquad (43.14)$$

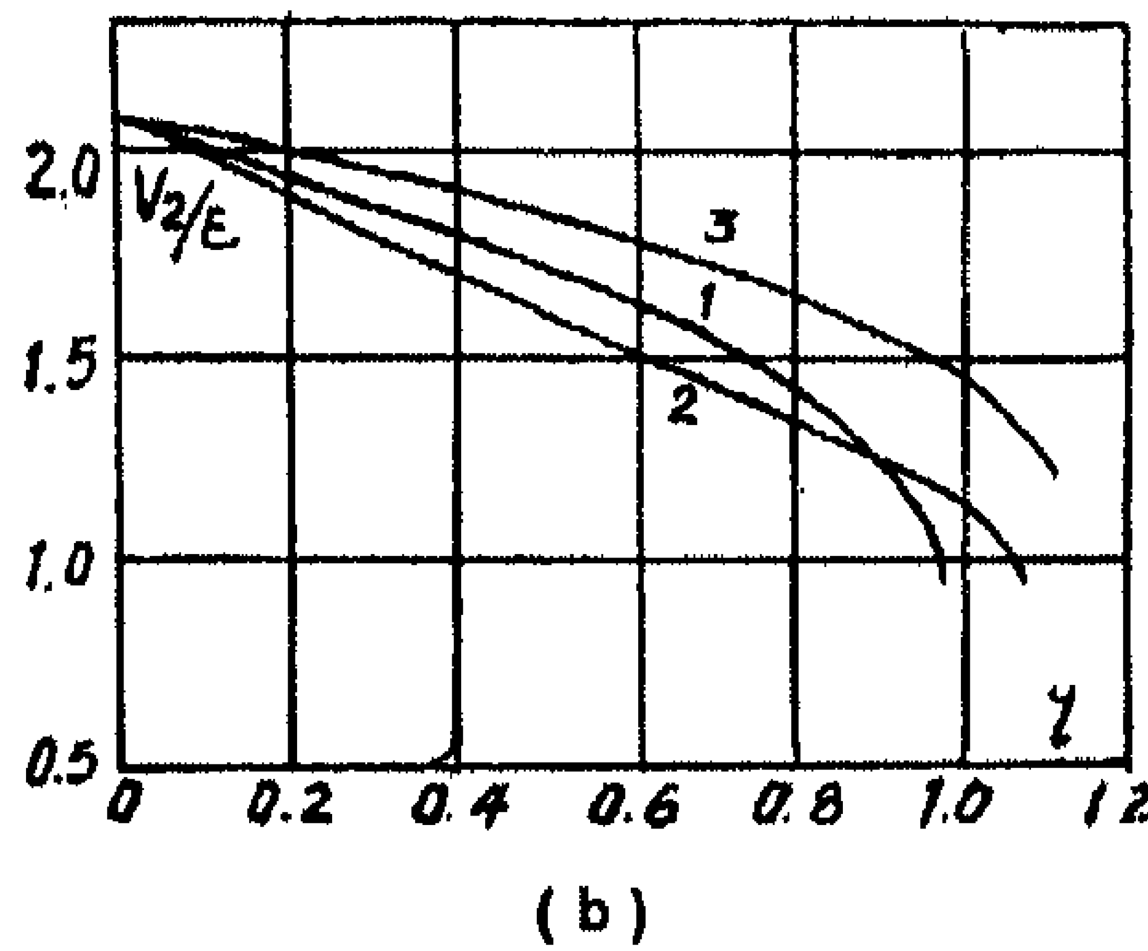
$$Z_{in} = -j\, Z \frac{\cos \alpha l + q_C \cos \alpha l_1 \sin \alpha l_2}{\sin \alpha l + q_C \sin \alpha l_1 \sin \alpha l_2} \qquad (44.14)$$

من هذه المعادلات نرى أنه -بعكس المفاعلات- تبذل المكثفات تأثيراً كبيراً إذا ركبت عند بداية الخط ولا يكون لها أي تأثير في النظام مفتوح-الدائرة إذا ركبت عند نهاية الخط. اعتماد القيمة الحدية [النهائية] لـ V_2 على q_C مع مكثف مركب في منتصف الخط موضح في الشكل 14.39. كما نرى، لنفس قيمة q تُحد المكثفات الجهود-الزائدة أقل من المفاعلات.

ويرجع ذلك لحقيقة أن المكثفات تسبب زيادة أقل في معاوقة الدخل Z_{in} للخط حسب المعادلات (14.42)، (14.44). إلى جانب ذلك –عادة– في خطوط النقل طويلة المسافة الحقيقية، تكون درجة التعويض المستعرض q_L/x_L حوالي %(75–50)، بينما درجة التعويض الطولي لا تتعدى %(50–40). لذلك، يبذل التعويض الطولي عادة تأثيراً غير ملموس على الجهود–الزائدة للتردد الأساسي ولا يمكن اعتباره كوسيلة للحد منها.



(a)

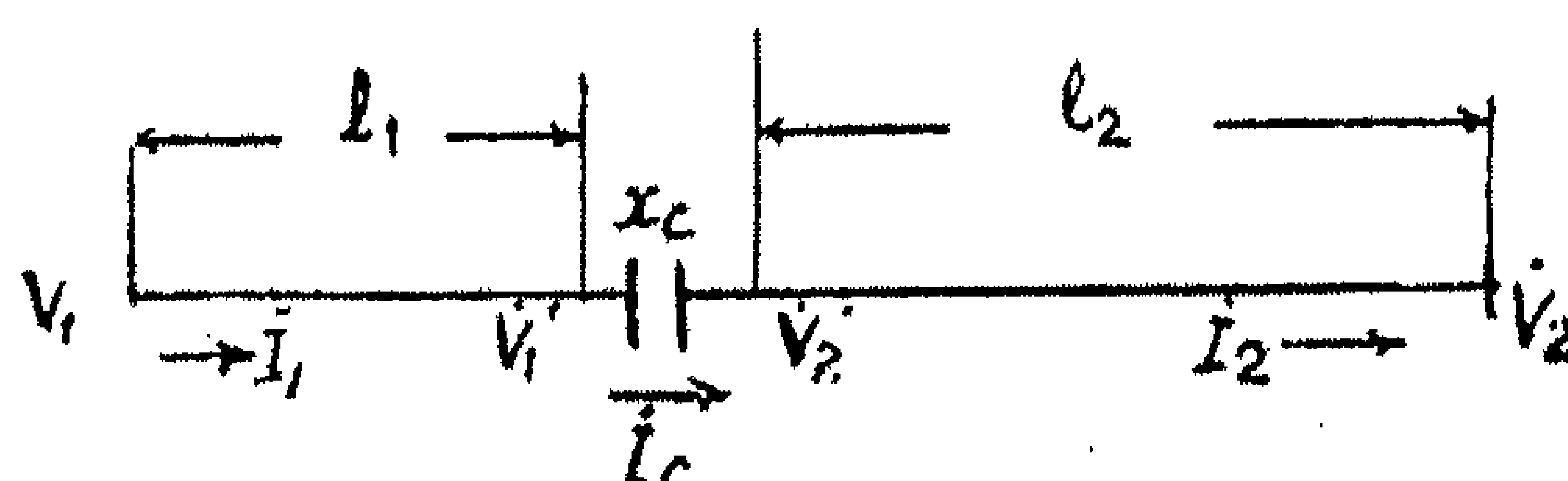


(b)

الشكل 14.39: منحنيات اعتماد أقصى جهد للتردد الأساسي على مقنن جهاز التعويض. (a) خط طوله 900 km؛ (b) خط طوله 600 km؛ (1) مفاعل عند منتصف الخط؛ (2) مفاعل عند نهاية الخط؛ (3) مفاعل عند بداية الخط؛ (4) مكثف عند منتصف الخط

وسندرس شروط تشغيل مكثفات التعويض الطولي. الجهد الاعتباري لمجموعة متواجدة من المكثفات يساوي حاصل ضرب مفاعلاتها x_C وتيار النقل الاعتباري وتكون عادة %(40–30)

من جهد الطور الاعتباري. ومع ذلك، في بعض الأنظمة [دوائر-القصر، ترجح المولدات بعد قطع دوائر القصر] يمكن أن يرتفع الجهد إلى قيمة أكبر بمرات قليلة من الجهد الاعتباري ويمثل خطراً على عزلها. لذلك تُركب مانعة واقية على التوازي مع المكثف، جهد تشغيلها يحدد الهامش الأساسي لمتانة العزل الكهربي لعزل المكثف.

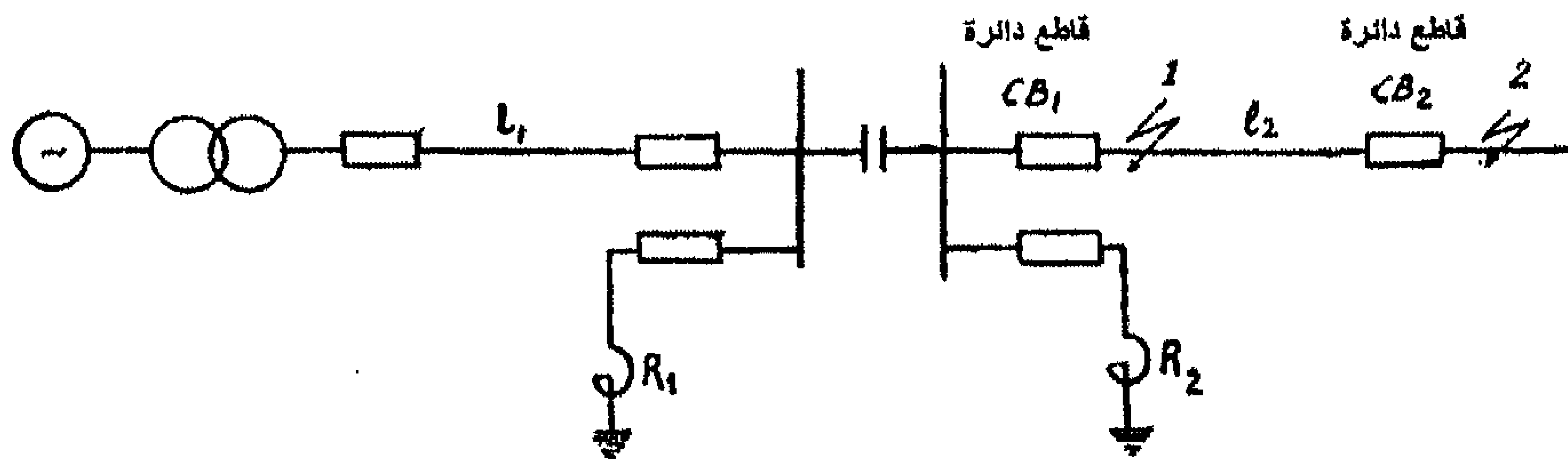


الشكل 14.40: مخطط مع مكثف تعويض توالي عند نقطة متوسطة من خط

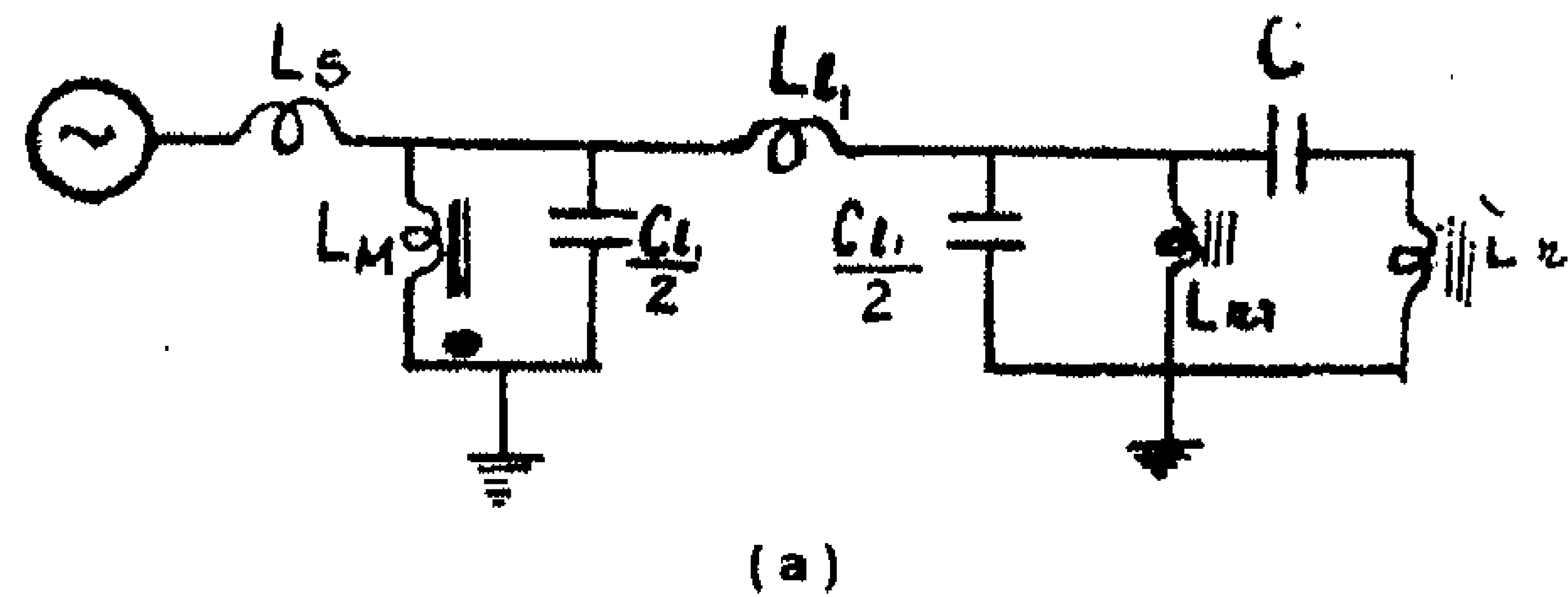
تثقب المانعة وتفرُّع المكثف أثناء دوائر-القصر هي ظاهرة غير مطلوبة على الإطلاق، حيث إن وجود المكثف في الدائرة أثناء زمن دائرة-القصر [وللدقة فوراً بعد التقطع] يكون جوهرياً لحفظ الاستقرار الديناميكي للنقل. لذلك، فإن المانعة يجب أن يتم إمدادها بجهاز لإطفاء القوس والذي سوف يقطع تفرع دائرة المكثف في الحال بعد تقطع دائرة-القصر. التأرجح الحادث في النظام بعد ذلك يجب ألا يسبب تشغيل متكرر للمانعة. هذا الظرف لا يسمح باختيار جهد التشغيل للمانعة ليكون منخفضاً. وعادة يقع ضبط المانعة بين $(2.5–4)V_N$، وفي أغلب الأحوال يتم اختياره مساوياً حوالي $3V_N$ -وعلاوة على ذلك- يجب اختبار عزل المكثفات بحيث يكون عند هذا الجهد لا يحدث تثقب العزل فقط، بل عمليات التأين التي تسبب تقدمها التدريجي في العمر لا يحدث أيضاً.

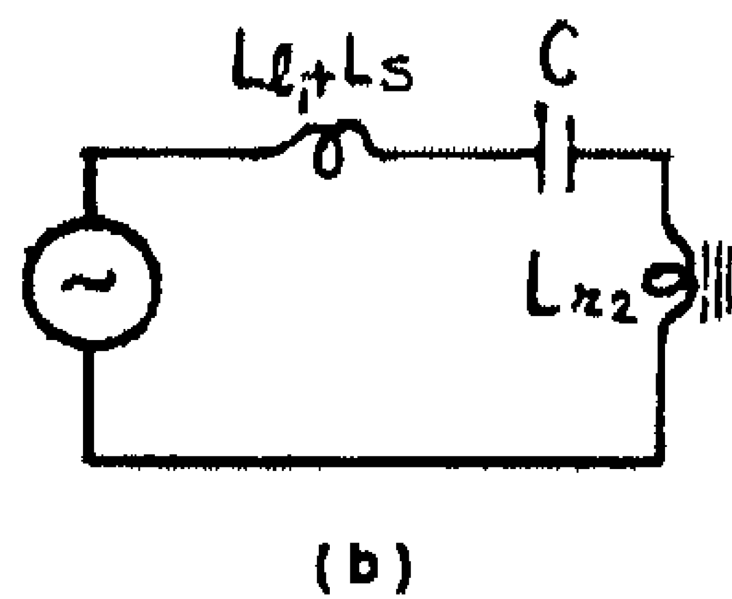
وسنأتي الآن لفحص الذبذبات غير-الخطية التي يمكن أن تحدث في الدائرة التي مع تعويض توالي. إذا وصِّل مفاعل له خصائص غير-خطية بعد المكثف [الشكل 14.41]، بعد قطع دائرة-القصر يتكون كنتور متذبذب بعد المفاعل، العناصر الأساسية له هي المفاعل ومجموعة من تعويض التوالي. بسبب القيم الكبيرة من السعة والمحاثة، فإن التردد الطبيعي لهذا الكنتور يحدث أن يكون منخفضاً جداً وبسببه فإن حدوث ذبذبات تحت-توافقية يكون ممكناً.

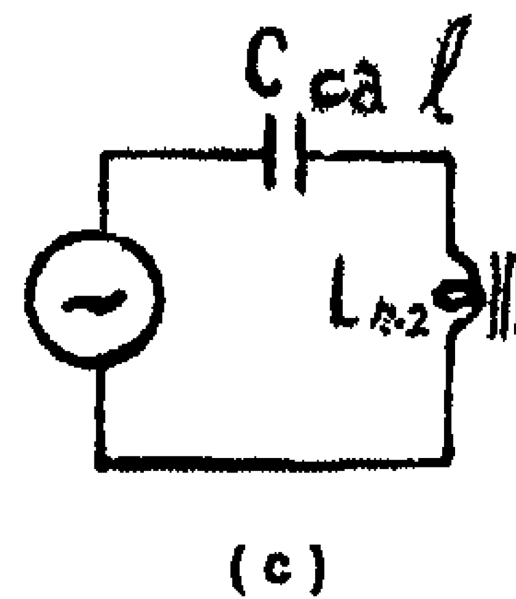
وللبدء: سنفحص الحالة عندما يحدث قطع النقل في الحال بعد المفاعل L_2 في دائرة الشكل 14.41، هذه الحالة يمكن أن تختصر إلى دائرة الكنتور المتذبذب البسيط [انظر البند ١٤-٣].



الشكل 14.41: مخطط يمكن أن تنتج فيه ذبذبات تحت توافقية بعد قطع دوائر–القصر عند النقطة 1 أو 2







الشكل 14.42: الدائرة المكافئة لحالة قطع دائرة–القصر بواسطة قاطع الدائرة CB_1 في الشكل 14.41

في الحقيقة، عند تردد منخفض للذبذبات تحت–التوافقية، يكون الطول الموجي للقطاع l_1 صغيراً ومن الممكن استبداله بدائرة مكافئة طراز–π اعتبارية [الشكل 14.42(a)]. من الممكن إهمال كل المحاثات حتى تعويض التوالي، أي المحاثة السعوية للخط، محاثة التفرع المغنطيسي والمفاعل L_1، حيث إنهم مفرعين بمحاثات صغيرة نسبياً [من L_s إلى L_s+L_l]. بعد ذلك نجمع المحاثة الموصلة قبل الخط مع محاثة الخط. وسوف نحصل على كنتور مع ثوابت مجمعة [الشكل 14.42(b)]. المرحلة الأخيرة من تحول الدائرة [الشكل 14.42(c)] هي استبدال توصيل التوالي للسعة C والمحاثة L_s+L_l بالسعة المكافئة للحساب C_{cal}، والتي تحسب من تساوي المعاوقات عند تردد منخفض:

$$\frac{1}{j\frac{\omega}{3}C_{cal}}=\frac{1}{j\frac{\omega}{3}C}+j\frac{\omega}{3}(L_s+L_l)$$

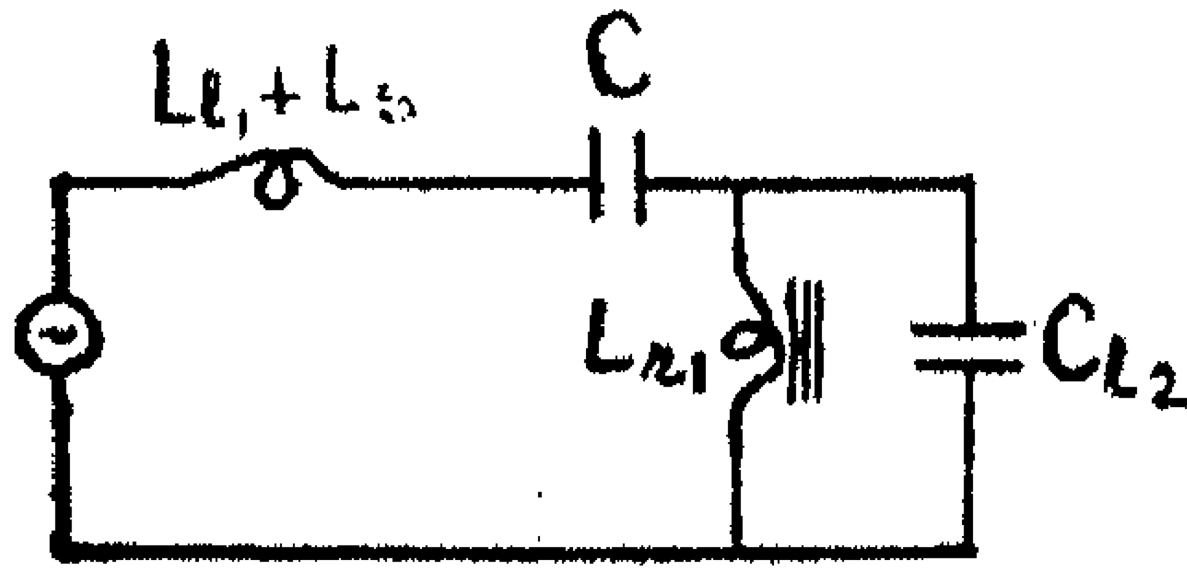
ومنها

$$C_{cal} = \frac{C}{1-\left(\frac{\omega}{3}\right)^2 C\left(L_s + L_l\right)} = mC \qquad (45.14)$$

حيث

$m = (1.1\text{–}1.5)$ [حسب المحاثة الموصلة قبل الخط وطول قطاع الخط].

إذا حدث القطع عند نهاية القطاع l_2 بعد المكثفات، يبقى القطاع المفتوح l_2 الذي يمكن أن يستبدل بواسطة السعة المجمعة C_{l_2} [الشكل 14.43] الموصل على التوازي مع المفاعل، ونتيجة لذلك نحصل على كنتور تذبذب ذو تردد مضاعف، والذي فيه يحدد التردد الثاني بمجموع المحاثات L_s ، L_l وسعة الخط. مع ذلك، ولكي تتواجد ذبذبات كل من الترددين آنياً في نظام الحالة المستقرة، فإن عدد من الشروط الإضافية تكون جوهرية سنتكلم عنها الآن. وإذا لم تتواجد هذه الشروط الإضافية، فإن دور السعة C_{l_2} ينخفض إلى التخفيض الملموس للذبذبات الطبيعية، أي أنها يمكن أن تهمل أو تضاف إلى السعة C_{cal}. في هذه الحالة أيضاً، تكون دائرة الشكل 14.43 مختصرة بالمثل إلى الكنتور الأبسط.



الشكل 14.43: الدائرة المكافئة لحالة قطع دائرة–القصر عند النقطة 2 بواسطة قاطع الدائرة CB_2 في الشكل 14.41

الشرط الأساسي لوجود التذبذب تحت–التوافقي هو أن يكون التردد الطبيعي للدائرة ω_0 لمفاعل غير مشبع أقل من $\omega/3$. في تطبيقات النقل طويل المسافة يمكن التعبير عن هذا الشرط بالأسلوب التالي:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r\,\omega C}} = \frac{\omega}{\sqrt{m\frac{x_r}{x_c}}} = \omega\sqrt{\frac{q_L\,q_C}{m}} < \frac{\omega}{3} \qquad (46.14)$$

الشرط (14.46) ينطبق غالباً في النقل طويل المسافة.

إمكانية استخدام صيغة الكنتور المتذبذب البسيط لتحديد التذبذبات تحت–التوافقية في النقل طويل المسافة تكون مؤكدة تجريبياً. أثناء ذلك يكون الخطأ 10% والذي يمكن اعتباره مقبولاً.

في تطبيقات خطوط النقل، يجب ملاحظة الخصائص التالية للتذبذب تحت–التوافقي:

١. الذروة amplitude في منطقة تواجد الذبذبات تحت–التوافقية تعتمد على سعة تعويض التوالي وبارامترات المفاعل، كل البارامترات الأخرى للنقل طويل المسافة تبذل تأثير ثانوي.

٢. كل القوانين الأساسية المتحصل عليها للكنتور المتذبذب البسيط تبقى حقيقية لنظام النقل طويل المسافة أيضاً، أي مع زيادة السعة وانخفاض درجة عدم–الخطية للخصائص، تنخفض المقاومات الحرجة، وتنتقل منطقة تواجد التوافقيات–التحتية في منطقة الجهود الكبيرة مع زيادة في الذروة.

٣. في وجود التوافقيات–التحتية يلاحظ زيادة حادة في التيار خلال المفاعل بسبب زيادة الجهد وأيضاً انخفاض المعاوقة للتيارات ذات التردد المنخفض. عند كل الشروط الأخرى متساوية، فإن التيار خلال المفاعل يرتفع مع زيادة درجة عدم–خطية المفاعل.

٤. تحدث الجهود–الزائدة أثناء الرنين تحت–التوافقي على مكثفات تعويض التوالي، على المفاعل وقطاع الخط الموصل بعد المفاعل. يرتفع الجهد على قطاع الخط حتى المكثف و–لذلك– مع القطع الفوري بعد تركيب تعويض التوالي، لا تبذل الكورونا عملياً أي تأثير على الذروة ومنطقة تواجد التوافقيات–التحتية. مع القطع عند نهاية القطاع l_2 تظهر الكورونا على هذا القطاع. ومع ذلك، حيث تنخفض مفقودات الكورونا مع انخفاض التردد، فإن تأثير الكورونا في هذه الحالة سيكون صغيراً. وهكذا، في نظام الحالة المستقرة تختلف كلا الدائرتين قليلاً عن بعضهما.

٥. ذبذبات التوافق–التحتي، بنفس الطريقة كما في الدائرة البسيطة، تحدث بعد نظام انتقالي مفعم بالطاقة –مثلاً– بعد قطع دائرة–قصر. تختلف كلا من حالات القطع بالشروط الابتدائية. مع دائرة–القصر بعد تركيب تعويض توالي، يكون الجهد على مكثفات تعويض التوالي أكبر من ذلك الذي مع دائرة–قصر عند نهاية القطاع l_2. في الحالة الأخيرة، منطقة حدوث التوافقيات التحتية يمكن أن تكون أضيق من منطقة تواجدهم، نتيجة جهد ابتدائي غير كافي.

٦. زيادة مركبة الجهد تحت–التوافقي يمكن أن تسبب تشغيل المانعة التي تحمي مكثفات تعويض التوالي، وبسببها فإن عدد الأنظمة ينخفض. هذه الظاهرة تكون أكثر احتمالاً في حالة استخدام مفاعلات مع خصائص غير–خطية ضعيفة.

١٤-٤-٩ الجهود-الزائدة في النقل طويل المسافة أثناء دوائر-القصر غير المتماثلة

Over-Voltage in Long Distance Transmission During Unsymmetrical Short-Circuits

أثناء الأنظمة المتماثلة للنقل طويل المسافة، تحدد كل العمليات بواسطة بارامترات تتابع الطور الموجب. أثناء دوائر-القصر غير المتماثلة، شبكة التتابع صفر -والتي فيها- بسبب تأثير الأرض- يكون طول الموجة للخط كبيراً، يبدأ لعب دوراً كبيراً. هذه الظروف تؤدي إلى حقيقة أنه أثناء دوائر-القصر غير المتماثلة، يمكن أن يكون الجهد على الطور السليم للخط أكبر من الجهد في غياب دائرة-القصر.

ولتحديد الجهد على الطور السليم بسبب تيارات دائرة-قصر، يمكن استخدام صيغة معروفة جيداً [البند ١٤-١]. ومع ذلك - أثناء استخدامهم، من الضروري اعتبار الخصائص التالية للخطوط الطويلة:

١. جهد الطور غير السليم في النظام العادي [بدون دائرة-قصر] يساوي الجهد عند نهاية الخط المفتوح، أي يمكنه أن يتعدى جهد الطور.

٢. معاوقات تتابعات الطور الموجبة، السالبة والصفر تعني معاوقات الدخل بالنسبة لنقطة دائرة-القصر أي أن معاوقات الدخل لقطاع الخط تُقصِر بواسطة معاوقة المصدر.

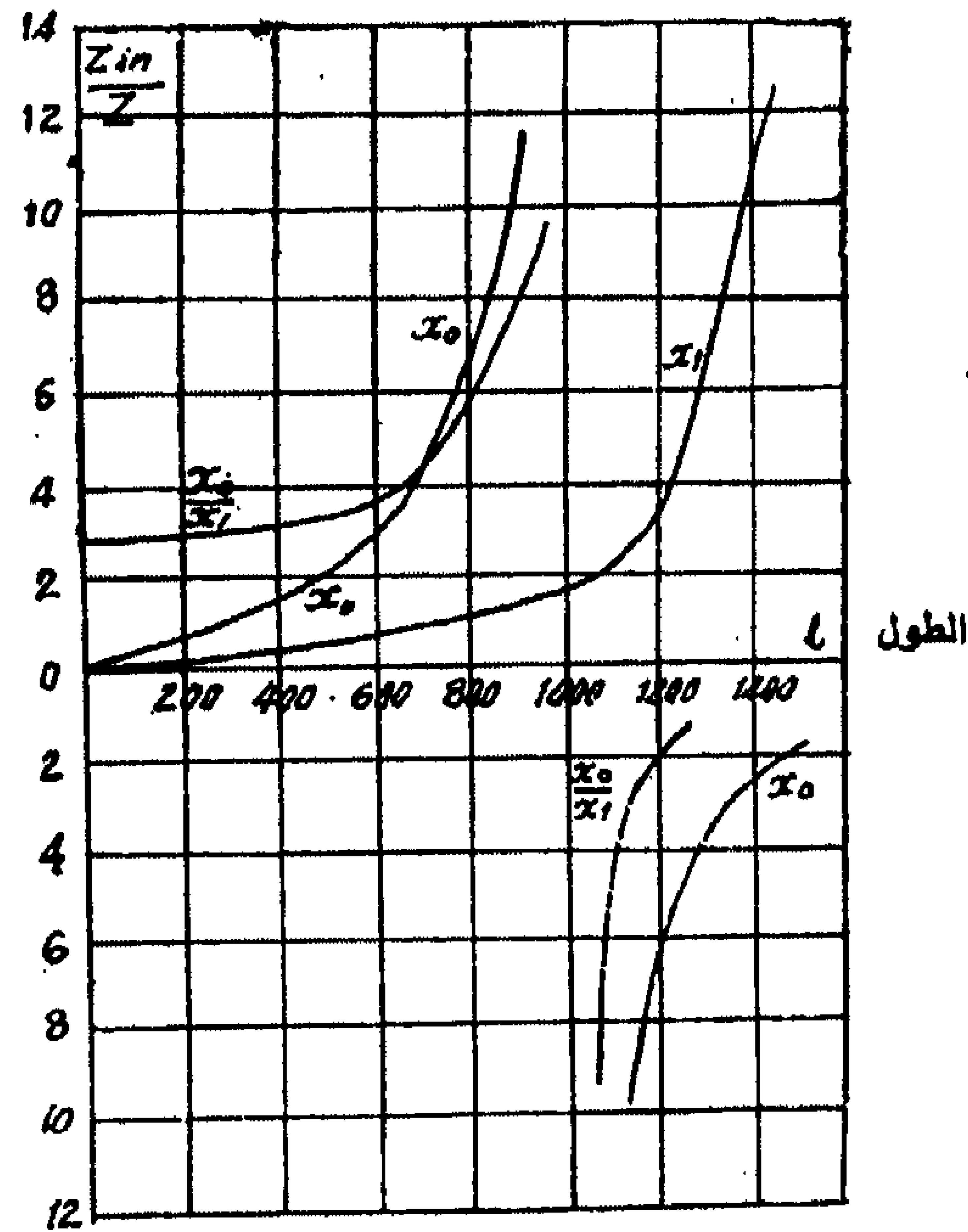
من الصيغة الأساسية للخطوط الطويلة من الممكن إيجاد تعبير لتحديد معاوقة الدخل التي لها الشكل التالي:

$$Z_{in.s.c} = \dot{Z}_c \frac{\tanh \gamma l + \dfrac{\dot{Z}_s}{\dot{Z}_c}}{1 + \dfrac{\dot{Z}_s}{\dot{Z}_c} \tanh \gamma l} \qquad (47.14)$$

إذا كان تأثير الكورونا لم يؤخذ في الاعتبار، فأثناء تحديد معاوقة التتابع الموجب، من الممكن إهمال المركبة الفعالة لـ γ ، $\dot{Z}_s$ ، والمركبة التخيلية لـ $\dot{Z}_{co}$ أي لنفرض أن $\dot{Z}_s = j\,x_s$ ، $\gamma = j\,\alpha$. لذلك فإن التعبير عن $Z_{in.s.c}$ يتحول إلى:

$$Z_{in.s.c} = j\,Z \frac{\tan \alpha l + \dfrac{x_s}{Z_0}}{1 - \dfrac{x_s}{Z_0} \tan \alpha l} \qquad (48.14)$$

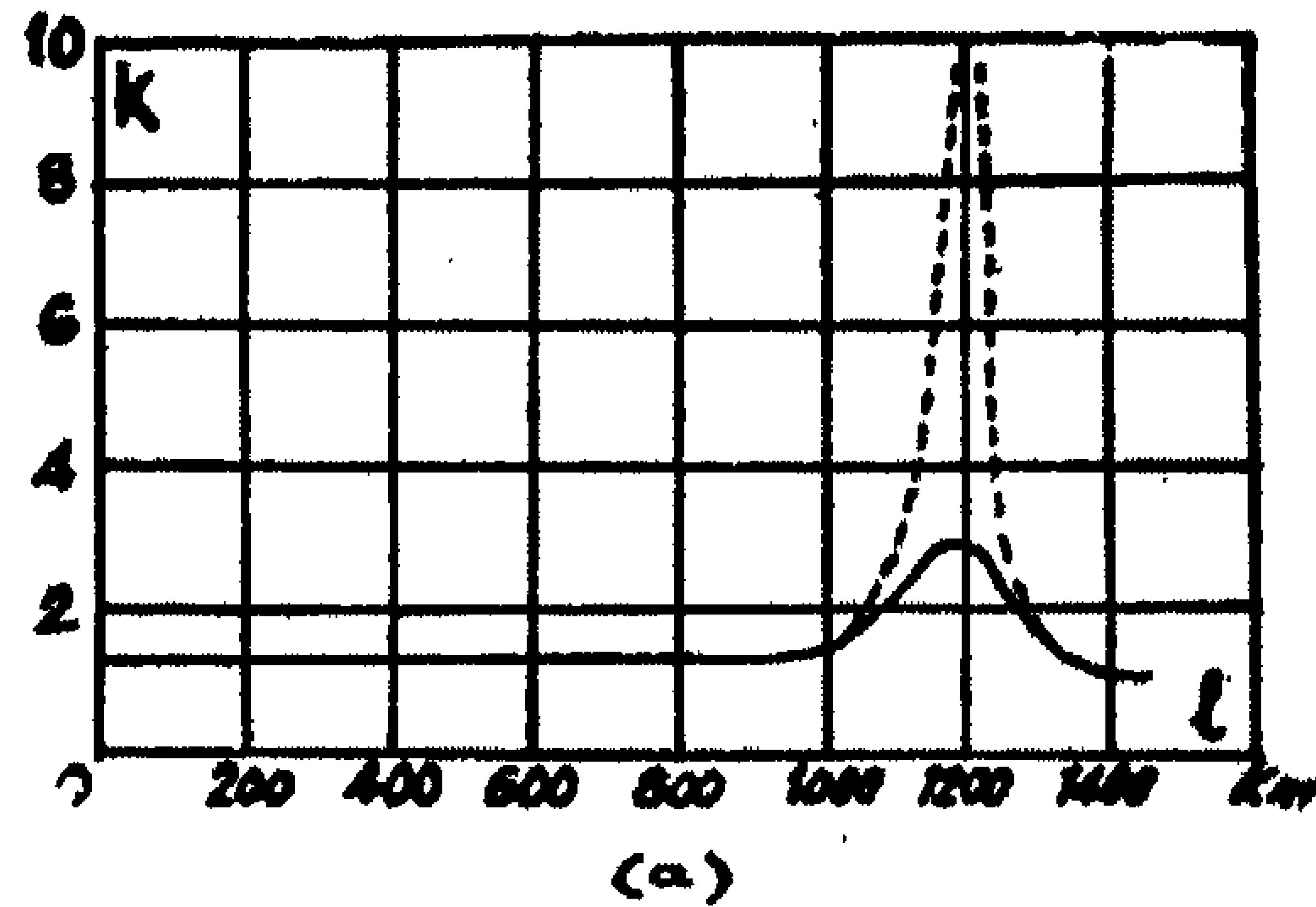
بالرغم من أنه في شبكة تتابع صفر تلعب المقاومة الفعالة دوراً كبيراً، فإننا سوف نهملها أيضاً للتقدير التقريبي. لذلك فإن المعادلة (14.48) تكون مناسبة أيضاً لتحديد معاوقة دخل تتابع صفر إذا عوضنا عن القيم المقابلة لـ α ، Z ، x_s فيها. معاوقة تموِّر تتابع الصفر تكون ضعف معاوقة تموِّر التتابع الموجب تقريباً والطول الموجي 1.5 مرة. وفي المقابل، تكون المحاثة الموصلة قبل الخط في شبكة التتابع صفر أقل من الصفر، بسبب وجود دلتا، فهي تحدد فقط بواسطة مفاعلة التسرب الحثي للمحول.

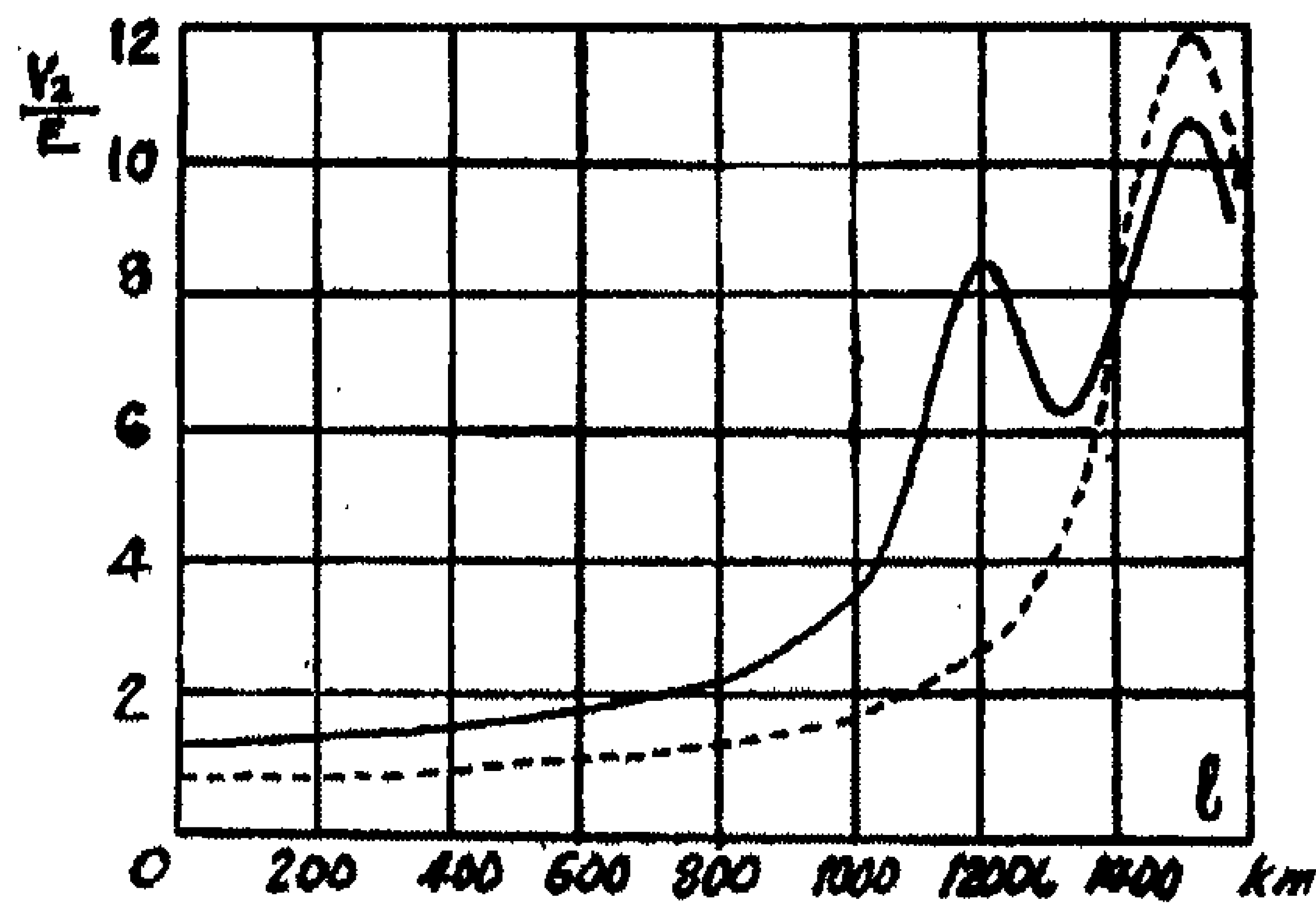


الشكل 14.44: منحنيات اعتماد معاوقات التتابع الموجب وصفر بالنسبة لنقطة دائرة–القصر على طول الخط

في الحالة النهائية عندما يوصل الخط بمصدر ذات قدرة لامتناهية $(x_s = 0)$ ، فإن معاوقة الدخل تتغير بالتناسب مع $\tan \alpha l$. اعتماد مفاعلات reactances الدخل للتتابعات الموجبة والصفر بالنسبة لنقطة دائرة–القصر على طول الخط موجودة في الشكل 14.44. وتصل معاوقة التتابع الموجب أقصاها عند $l = 1500$ km ، أي عند طول خط يساوي $\frac{1}{4}$ الطول الموجي لجهد المصدر. تردد الذبذبات الطبيعية لهذا الخط –كما سبق ورأينا– تساوي تردد الدائرة، وإذا كانت نهاية الخط مُقَصِرة فإن رنين التيار يحدث. تصل معاوقة تتابع الصفر أقصاها عند

$l = 1000$ km ، حيث إن تغير الطور لكل وحدة طول لتيارات تتابع صفر يكون 1.5 مرة من ذلك الخاص بتيارات التتابع الموجب. مع مزيد من الزيادة في الطول، تغير المعاوقة إشارتها وبعد ذلك تقل في القيمة المطلقة. منحنى اعتماد النسبة x_0/x_1 على الطول [x_0/x_1 تحدد ما يسمى "درجة تأريض التعادل"] معطى أيضاً في الشكل 14.44.





الشكل 14.45: اعتماد ارتفاع الجهد على الأطوار السليمة أثناء عطل طور–أرضي على طول الخط. (a) نسبة الجهد على الطور السليم أثناء عطل طور–أرضي إلى الجهد على هذا الطور في حالة دائرة–القصر التماثلية. الجهد بدون اعتبار المقاومة الفعالة لتتابع الصفر موضحة بشَرْط، ومع اعتبار هذه المقاومة بخط مستمر؛ (b) الجهد على الطور السليم عند نهاية خط غير محمل أثناء عطل طور–أرضي، ارتفاع الجهد في النظام المتماثل في غياب العطل موضح بخط مُشَرَّط

بالرغم من حقيقة أن المحول يكون مؤرض مُصمت، فإن النسبة x_0/x_1 تحصل غالباً على كل المدى الممكن من القيم من 3 إلى $+\infty$ ومن ∞ إلى 0. من الممكن إيجاد المعامل K ، أي

نسبة الجهد على الطور السليم إلى جهد النظام المتماثل. اعتماد K على l بدون ومع اعتبار المقاومة الفعالة لتتابع الصفر معطى في الشكل 14.45(a). بالنسبة لـ $x_0/x_1 = -2$ والتي تقابل $l = 1200$ km، تصل K إلى نهاية عظمى، أي رنين الجهد لنوعها الخاص بها يحدث في الدائرة المشكلة بواسطة توصيل توالي شبكات التتابعات المختلفة.

ولكي نحصل على القيمة المطلقة للجهد على أطوار سليمة، من الضروري ضرب K في جهد النظام المتماثل، أي الجهد عند نهاية الخط المفتوح. وقد نُفذ هذا الإنشاء في الشكل 14.45(b). المنحنى $V_2 = f(l)$ مع دائرة–قصر على أحد أطوار الخط المفتوح له نقطتي رنين. ولكن من الطبيعي أن هذه القيم العالية من الجهد لا يمكن الحصول عليها عملياً بسبب حدوث الكورونا والتي تُحد من الجهود الزائدة –ومع ذلك– فإن المنحنى يشير إلى خصوصية الظاهرة وإمكانية ارتفاع الجهد الإضافي في النظام غير المتماثل.

إذا كان المصدر ذو قدرة محدودة فإنه بسبب تأثير المحاثة الموصلة قبل الخط، يمكن حدوث رنين حتى عند أطوال أصغر من الخطوط.

١٤-٤-١٠ الجهود الزائدة في النظام العابر Over-Voltage in Transient Regime

الجهود القصوى على العزل أثناء عملية عابرة [عارضة] transient –كقاعدة– تتعدى إلى حد كبير الجهود الزائدة لنظام الحالة المستقرة ولكنها تكون أقل في فترتها الزمنية إلى حد كبير.

العلاقة بين اقصى قيمة للجهود في النظام العابر وذروة نظام الحالة المستقرة يحدد بالمعادلة:

$$V_{max} = K V_{s.s} \tag{49.14}$$

حيث إن المعامل K يعتمد على بارامترات الدائرة، والشروط الابتدائية للدائرة، ونوع التوحيد، وتفرق [استطارة] scatter تشغيل مفاتيح الأطوار المنفردة، وعوامل أخرى.

وسوف نعتبر تشغيل المفاتيح على خط لا يحتوي على عناصر غير–خطية لمصدر ذات جهد جيبي. ولن نعتبر تخميد.

الجهد عند طرف الخط يكون

$$V_2(t) = A \cos \omega t - \Sigma \dot{B}_k \cos \omega_k t \tag{50.14}$$

حيث A = ذروة جهد نظام الحالة المستقرة.

B_k = ذروة الذبذبات الطبيعية للترددات المختلفة.

$$\dot{B}_k = E\frac{2\omega_k^2}{\left(\omega_k^2-\omega^2\right)\left(\cos\omega_k\tau+\dfrac{\omega_k\tau}{\sin\omega_k\tau}\right)}$$

$$= E\frac{\omega_k^2\,\varphi(\omega_k\tau)}{\left(\omega_k^2-\omega^2\right)} \qquad (51.14)$$

ويتم إيجاد الترددات الطبيعية للدائرة ω_k بمساعدة الرسوم البيانية. مركبات $\dot{B}_k$ تحسب من قيم $\omega_k\tau$ ، ω_k السابق الحصول عليها. المعامل $\omega_k^2/\left(\omega_k^2-\omega^2\right)$ عند $k=1$ يمكن أن يتغير خلال حدود واسعة. وحيث إنه في معظم الحالات، تعمل الدائرة في شروط ما قبل الرنين $(\omega_1>\omega)$ فهذا العامل يكون موجباً ويمكن أن يكون أكبر من الواحد الصحيح. للتوافقيات الأعلى $\omega_k>>\omega$ ، أي أن $\omega_k^2/\left(\omega_k^2-\omega^2\right)$ تختلف قليلاً عن الوحدة.

الدوال $\omega_k T$ موقعة في الشكل 14.46 كدالة في البارامتر T/τ –والذي– يحدد قيم $\omega_k\tau$. النسبة T/τ يمكن أن توضع في الصيغة التالية:

$$\frac{T}{\tau}=\frac{\omega L_s}{Z\,\omega\sqrt{LC}\cdot l}=\frac{L_s}{L_c}$$

بهذه الطريقة، $T/\tau=L_s/L_c$ هو نسبة المحاثة المجمعة إلى الموزعة. من الشكل 14.46 والمعادلة (14.51) نرى أنه مع تغير T/τ من 0 إلى ∞ ، $\omega_1\tau$ تتغير من 1.28 إلى 1، $\omega_2\tau$ ، $\omega_3\tau$ تخمد سريعاً.

من الشروط الابتدائية $(t=0)$ لدينا:

$$A-\Sigma B_k=0 \qquad (52.14)$$

من الشكل 14.46 والمعادلة (14.51) نرى أن $\Sigma\dot{B}_k$ تعطى بمتوالية [متسلسلة series] فيها إشارات الحدود المتعاقبة تتناوب ومقادير حدودها تتناقص بسرعة. إذا كان مقياس $\dot{B}_k$ ممثل بـ B_k ، $A=B_1-B_2+B_3-B_4$ وهكذا، أي أن $B_1>A$.

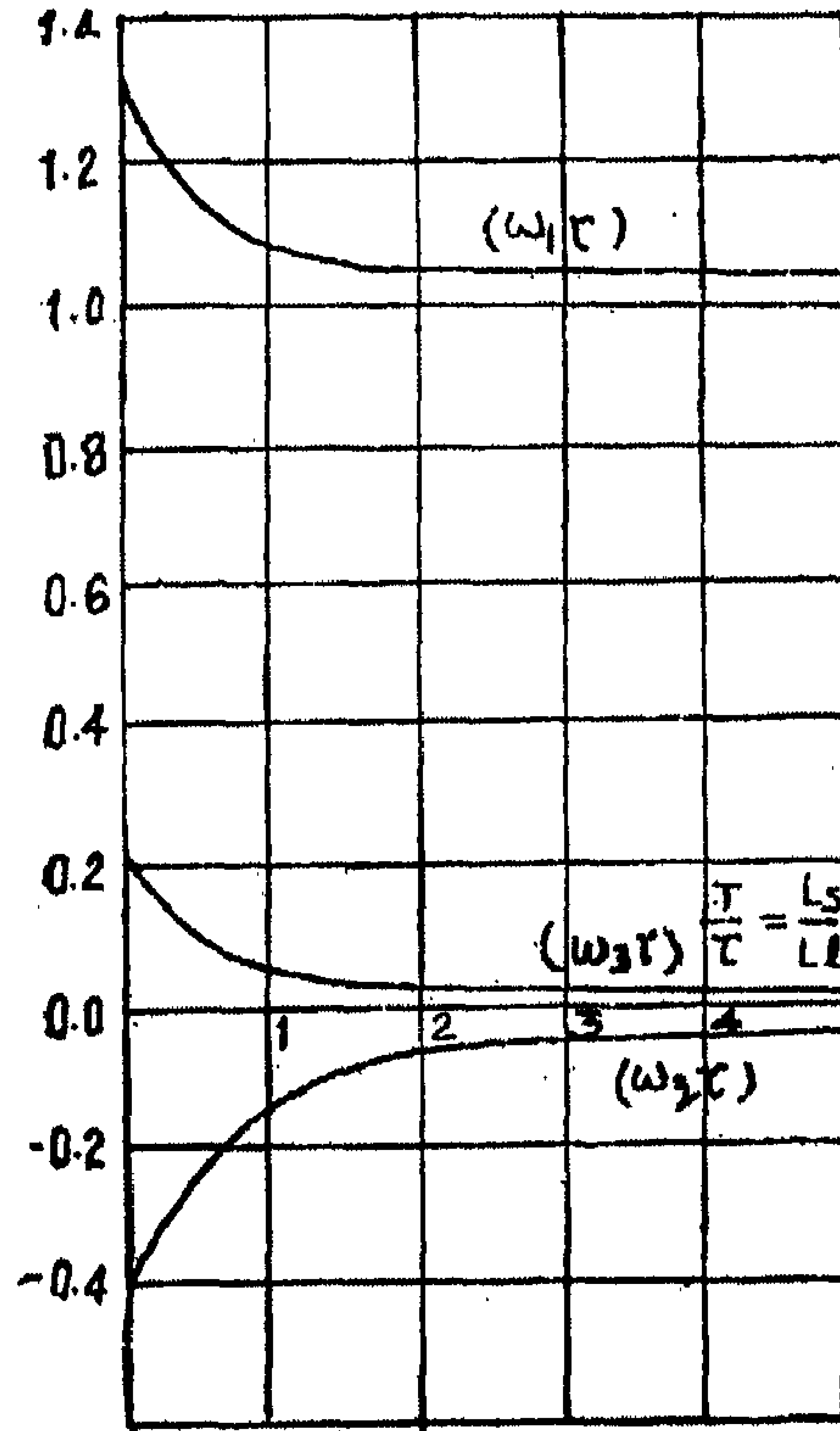
هذا يعني أن ذروة المركبة الحرة للتردد الأساسي لا يساوي مركبة نظام الحالة المستقرة، كما في حالة كنتور الذبذبة البسيطة. تساوي الجهود بالصفر عند اللحظة الابتدائية يرجع إلى التوافقيات العليا.

يحدث أقصى جهد عند لحظة الانطباق في الطور للقيمة اللحظية لمركبة نظام الحالة المستقرة مع مركبة الذبذبات الحرة للتردد الأساسي. من الممكن تخيل –كحالة نهائية– أن تلك

الحالة عند الانطباق في الطور ستحدث أيضاً لمركبة التوافق الأعلى. عندئذ فإن الجهد الأقصى للنظام العابر في النهاية يصبح مساوياً للآتي:

$$V_{2_{max}} = A + B_1 + B_2 + B_3 + \ldots \qquad (53.14)$$

$$K = \frac{V_{2_{max}}}{V_{s.s}} = 1 + \frac{B_1 + B_2 + \ldots}{A} > 2$$



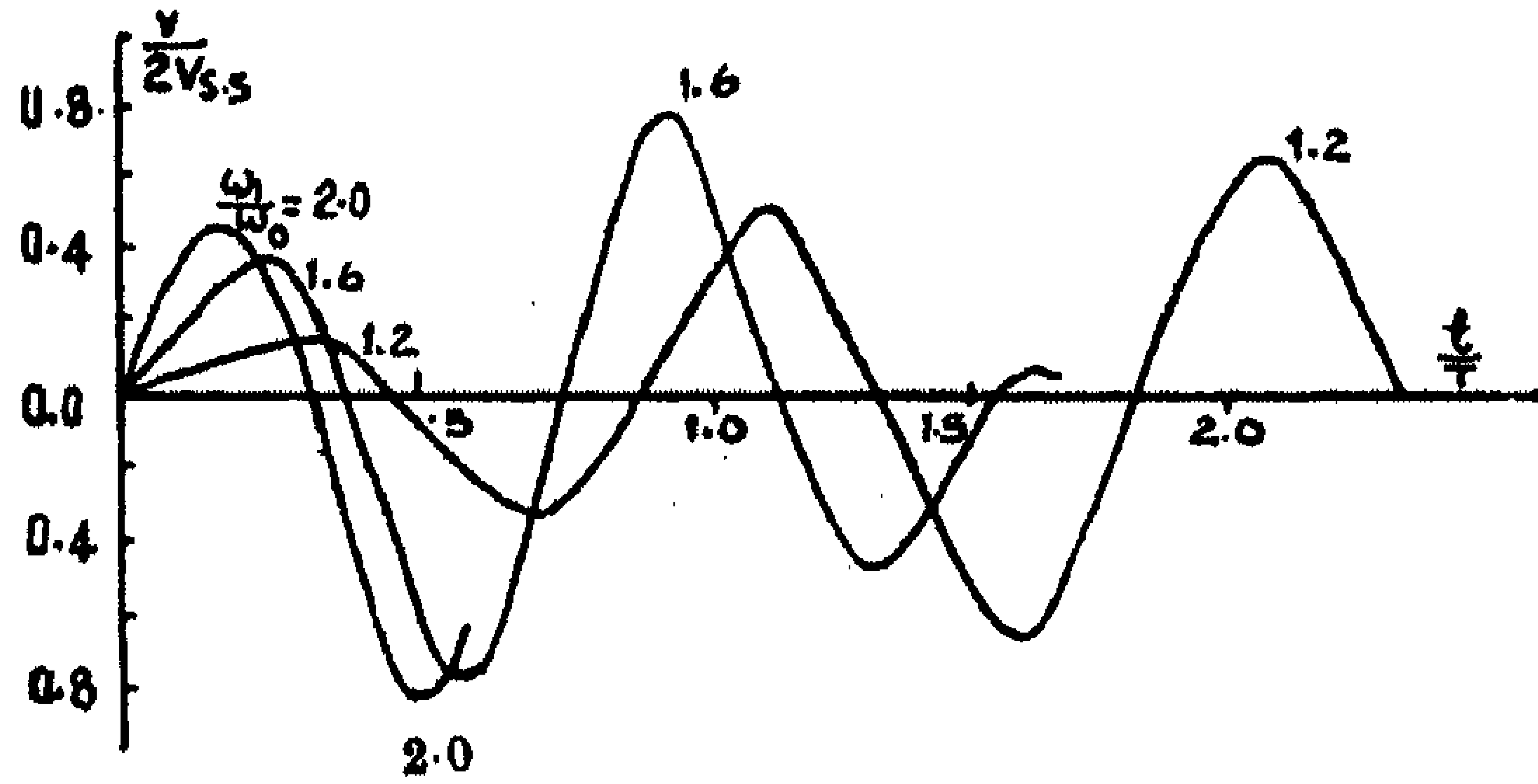
الشكل 14.46: اعتماد $\omega_1\tau$ ، $\omega_2\tau$ ، $\omega_3\tau$ على النسبة $T/\tau = L_s/L_l$

بهذا الأسلوب –على النقيض من الكنتور التذبذبي البسيط– فإن المعامل K أثناء تشغيل المفاتيح على الخط الطويل [مع تردد $\omega > \omega_1$] يمكن أن يكون أكبر من 2 بسبب التوافقيات الأعلى. مع ذلك، فإن هذه الخاصية للخط الطويل تنكشف مع تخميد وقيم صغيرة لـ T/τ، أي في هذه الحالات التي تكون المحاثة المجمعة صغيرة مقارنة مع الموزعة. من الشكل 14.46، نرى أنه بالنسبة لـ $T/\tau > 1$ ينخفض إسهام التوافقيات العليا ومركبة التردد الأساسي تقترب من نهاية محددة، أي يبدأ الخط عملياً في التصرف مثل كنتور تذبذبي بسيط. وبملاحظة ميل

K للزيادة مع زيادة قدرة المصدر [انخفاض L_s ، T] والزيادة في طول الخط τ —سوف نعمل في المستقبل في معظم الحالات— على الدائرة الأبسط.

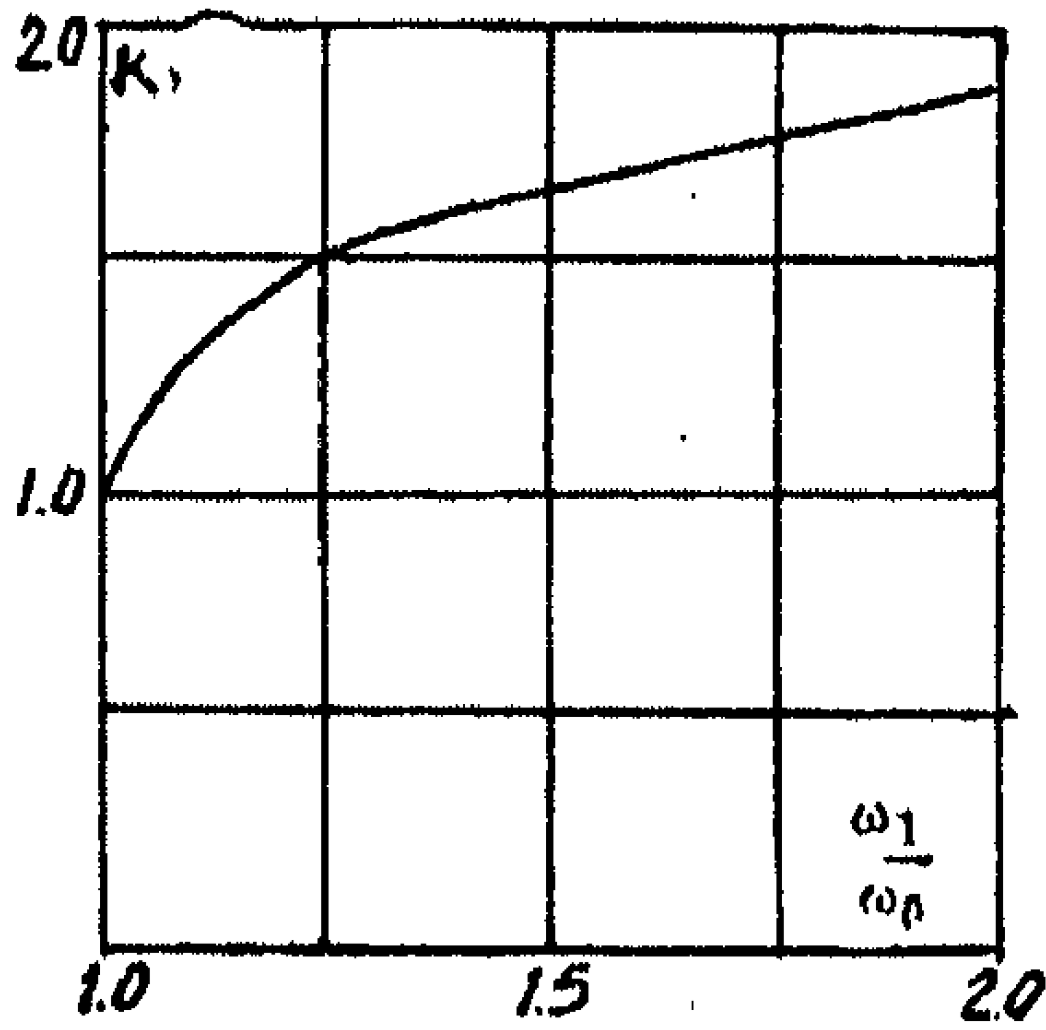
في البند ١٤-٣ تم شرح تحليل الكنتور المتذبذب الخطي، ويمكن تطبيق المعادلة التالية للخط الطويل أيضاً:

$$V_2(t) = V_{s.s}\left(\cos \omega t - e^{-\delta t}\cos \omega_1 t\right) \quad (54.14)$$



الشكل 14.47: طبيعة نمو الجهد في حالة توصيل الخط بمصدر ذات جهد جيبي لقيم مختلفة من النسبة ω_1/ω_0

في الشكل 14.47 معطى منحنيات نمو الجهد عند نهاية الخط أثناء تشغيل المفاتيح له، ومنها نرى أنه مع تخفيض ω_1/ω يتباطأ نمو الجهد، وهكذا بالنسبة لـ $\omega_1/\omega=2$ يعمل أقصى جهد عند حدود أنصاف الدورات الأولى والثانية وبالنسبة لـ $\omega_1/\omega=1.6$ ، في اتجاه نهاية نصف الدورة الثانية وبالنسبة لـ $\omega_1/\omega=1.2$ في نصف الدورة الخامسة. كلما تباطأ نمو الجهد زاد تأثير التخميد وانخفض المعامل K. طبيعة تغير المعامل K نراه في الشكل 14.48. ومن الواضح أنه كلما قرب النظام من الرنين وكبر التخميد، كلما صغرت قيمة K.



الشكل 14.48: اعتماد المعامل الديناميكي K على النسبة ω_1/ω_0

إذا تعدى الجهد في النظام العابر جهد الكورونا، فإننا نبدأ في الشعور بتأثير الكورونا، ولكن تأثيرها في الحد من الجهود-الزائدة يبدأ بعد 2 أو 3 نصف دورة فقط، حيث تيار الكورونا الساكن والمفقودات المرتبطة به، تأخذ زمن محدد لتنشأ. لذلك، في هذه الحالات عندما يكون النظام بعيداً عن الرنين ويصل الجهد الأقصى في نصف الدورة الأولى أو الثانية، فإن الكورونا لا تؤثر على المعامل K. مع الزيادة البطيئة في الجهد تستطيع الكورونا المساهمة في تخميد إضافي، وفي الظروف القريبة من الرنين، فإن تأثيرها يكون محسوساً جداً.

التفرع المغنطيسي لمحول في معظم الحالات يسبب زيادة في K، حيث إن التفرع المغنطيسي يُخفض إلى حد ما جهد نظام الحالة-المستقرة، ولكنه يبذل تأثيراً قليلاً على المراحل الابتدائية للظاهرة العابرة. ويرجع ذلك إلى الثابت الزمني الكبير للتفرع المغنطيسي والذي بسببه فإن فعله في الحد من الجهود-الزائدة يأتي بعد بعض الوقت. إذا أقيمت الدائرة على حافة الاستقرار للتوافقية الثانية، في النظام العابر فإن هذه التوافقية يمكن أن تحدث، لذلك يرتفع للجهد الأقصى، ولكن في نظام الحالة-المستقرة فإن هذه التوافقية لا تحدث. في هذه الحالة يمكن للمعامل K أن يكون أكبر من 2 .

١٤-٤-١١ تقييد الجهود-الزائدة الداخلية Limitation of Internal Over-Voltages

أشرنا في بداية البند ١٤-٤ أن استخدام 500 kV يكون مطلوباً إذا كان مستوى العزل لا يتعدى $2.5V_{ph}$. وقد أظهرت الحسابات التقريبية، الأبحاث على نماذج وتجارب على النظام الفعلي أن جهود الحالة-المستقرة نادراً ما تتعدى هذه القيمة، بينما الجهود-الزائدة للنظام العابر يمكن أن تصل إلى قيمة ثلاثة أمثال جهد الطور V_{ph} وأكثر. وبالتالي، على النقيض للأنظمة حتى 220 kV، يكون التقييد الجبري للجهود-الزائدة في النقل طويل المسافة لـ 500 kV أساسياً.

مبادئ التزود بحماية من الجهود الزائدة يمكن أن تختلف. فالإجراء الأول هو التقييد أو الحد منها بمساعدة إجراءات الدائرة والتشغيل الأوتوماتي للنظام. الإجراء الثاني هو التحكم في جهد نظام الحالة-المستقرة والذي بالتالي يسبب تخفيض في الجهود الزائدة في النظام العابر. الخطوة النهائية والثالثة تتكون من اتخاذ الإجراءات التي ستُحد من الجهود الزائدة في النظام العابر فقط. في خطوط النقل الحديثة تُستخدم كل الثلاث طرق التي تدعم بعضها البعض.

(أ) إجراءات الدائرة Circuit Measures

يمكن أن تشمل إجراءات الدائرة لتقييد الجهود-الزائدة الآتي بعد: ترتيب المعاملات المخفضة لتحويل المحولات-الذاتية، استخدام نظام مجمع بدون قواطع-دائرة على الجانب عالي الجهد في الدائرة.

استخدام المفاعلات reactors وسيلة فعالة جداً للحد من الجهود-الزائدة. هذا الإجراء مثل ترتيب المعاملات للتحولات يمكن أن يستخدم فقط عند زمن الغلق العادي لخط مفتوح أو في نظام نقل ذو أحمال صغيرة. أثناء نقل أقصى قدرة والتي يمكن أن تكون قريبة من السعة الطبيعية، فإن توصيل المفاعلات عند النقط المتوسطة من الخط تكون غير مسموحة، حيث إنها تسبب خفض الجهد عبر الخط، زيادة المفقودات وتخفيض حد الاستقرار.

استخدام أنظمة مجمعة بدون قواطع دائرة على الجانب عالي الجهد يستبعد الأنظمة التي يفتح فيها الخط عند النهاية ويكون موصلاً بالموصلات العمومية للمحطة أو النظام. حيث الخط يكون متقطع على جانب الجهد المنخفض، يحدث أن يكون محول غير محمل أو محول ذاتي موصلاً عند نهاية الخط، فإن الخصائص المغنطيسية غير-الخطية له تقيد بحدة جهد التردد الأساسي، ولكنها تستطيع إحداث رنين عند توافقيات عالية أو إثارة-ذاتية للتوافقية الثانية. منطقة الإثارة-الذاتية للتوافقية الثانية تكون ضيقة جداً، هذه الظاهرة يمكن التنبؤ بها مبكراً ويمكن أن تُمنع بواسطة تغيير صغير لبارامترات الدائرة على الأقل. عيب النظام عديم قواطع-الدائرة على جانب H.V. هو خطورة شروط تشغيل المحول، والتي تتعرض في الغالب لارتفاعات في الجهد.

إجراءات الدائرة، وخاصة استخدام المفاعلات، يمكن أن تكون فعالة جداً، ولكنها ليست ممكنة دائماً للاستخدام.

(ب) وقاية المرّحلات والتشغيل الأوتوماتي Relay Protection & Automation

قيمة وفترة دوام الجهود-الزائدة تعتمد إلى حد كبير على تتابع عمليات قواطع-الدائرة. فمثلاً، في حالة استخدام حماية مسافة بدون تيار حامل، أثناء دائرة-قصر غير متماثلة عند طرف واحد من الخط، فإن عمليات قواطع-الدائرة عند هذا الطرف تحدث مع تأخير حوالي 0.12 sec. وعند الطرف المعاكس مع تأخير حوالي sec. (0.8-0.5). وبهذه الطريقة، يمكن تواجد ارتفاع في الجهد مع تقطع الخط على جانب واحد أثناء دائرة-قصر غير متماثلة عبر فترة زمنية في حدود

0.5 sec. استخدام حماية طور فرقي مع تيار حامل يخفض فترة دوام هذا النظام بأكثر من 10 مرات.

ويمكن تخفيض فترة دوام تواجد ارتفاع الجهد بمساعدة حماية مرَّحل، والذي يعمل مع التأخير الأول عند تشغيل مفاتيح المفاعلات ومع التأخير الثاني عند فصلهم.

إذا كان الخط يوصل نظامين أو محطات، يختلفان عن بعضهما في السعة، يكون مرغوباً أن تشغل أولاً قواطع الدائرة التي عند الموصلات العمومية للنظام ذات السعة الأصغر، ثم يحدث أن الخط المفتوح يوصل إلى النظام مع أدنى مفاعلة reactance، بينما مع التتابع الآخر لتشغيل قواطع–الدائرة الموجودة في الخط تفتح عند طرف واحد على الموصلات العمومية التي لها مفاعلة كبيرة ستسبب جهود–زائدة أعلى. ويمكن أن يضمن التشغيل الأوتوماتي سريع الفعل الخاص تتابع جوهري لعمليات قواطع–الدائرة، أي يستبعد إمكانية غلق قواطع–الدائرة عند النظام الأقل قدرة أولاً وفصله فيما بعد. هذه الطريقة من طرق تقييد الجهد–الزائد فعالة جداً، ولكن التأخير في تشغيل قاطع–الدائرة عند الموصلات–العمومية للنظام القوي عند زمن دائرة–قصر يكون غير مرغوب من وجهة نظر الاستقرار.

مُنظِمات التأثير القوي التي تبقي الجهد عند الموصل العمومي ثابتاً مع زيادة الاستقرار، تمنع في نفس الوقت إمكانية التواجد الطويل للجهود–الزائدة للرنين، وخاصة الإثارة–الذاتية للتوافقية الثانية. ومع ذلك، فإن تأثير المنظِمات يدوم فترات قليلة بعد التوحيد –لذلك في معظم الحالات– لا يكون لها تأثير على ذروة النظام العابر.

(ج) مقاومات التفرع في قواطع-الدائرة Shunting Resistance in Circuit-Breakers

استخدام مقاومات التفرع في قواطع الدائرة تنتمي إلى مجموعة الإجراءات التي تعمل فقط على الجهود–الزائدة للنظام العابر ولا تبذل أي تأثير على ارتفاع الجهد لنظام الحالة المستقرة. للتوحيدات المختلفة فإن آلية فعل مقاومة التفرع [التوازي] تكون مختلفة بالمثل. أثناء تقطع الخطوط المفتوحة تخفض مقاومات التفرع الشحنة المتخلفة على الخط وجهد إعادة الإشعال على التلامسات الرئيسية. وبذلك ينخفض احتمال إعادة الإشعال.

أثناء تقطع دائرة–القصر أو التشغيل غير المتزامن، تخمد مقاومات التفرع العملية التذبذبية.

أظهرت التجارب المنفذة على النماذج أن قيم مختلفة من المقاومات تكون مطلوبة أيضاً عند هذه التوحيدات. فإذا كان استخدام مقاومة تفرع 3000 Ω تسمح عملياً بمنع الجهود–الزائدة

أثناء تقطع الخطوط المفتوحة، فإنه لتخفيض الجهود–الزائدة أثناء قطع الخط في نظام التشغيل غير المتزامن، يكون أساسياً تخفيض هذه المقاومة إلى قيمة أقل من $2000\,\Omega$. وهذا يتطلب زيادة محسوسة في سعة قطع العازل. مع ذلك، حتى قيمة المقاومة السابق ذكرها لا تضمن دائماً تخفيض الجهود–الزائدة للنظام العابر حتى $2.5V_{ph}$. وبالمثل باعتبار أن مقاومات التفرع تعقد المعدة وتزيد من تكلفة قاطع الدائرة، حالياً اتخذ قرار بالامتناع عن استخدام مقاومات التفرع في قواطع الدائرة 500 kV .

(د) مانعة الصمام الذاتي المغنطيسية الموحدة The Combined Magneto-Auto-Valve Arrestor

المانعات معنية فقط لتقييد الجهود–الزائدة للعمليات العابرة.

في مانعة الصمام–الذاتي–المغنطيسية، وبنفس الطريقة كما في مانعة الحماية من الصواعق، تستخدم المقاومة غير الخطية والدفع المغنطيسي. مع ذلك، فإن شروط عمل المانعة التوحيدية commutational يختلف جذرياً عن تلك الخاصة بمانعة الحماية من الصواعق. في الحقيقة، فإن اختيار خصائص مانعة الوقاية من الصواعق تحدد بنظامين: مرور تيار دفعي كبير [كيلوأمبيرات] في فترة زمنية صغيرة جداً [أعشار من الميكروثانية] ونظام الإطفاء. الذي في الأنظمة ذات التعادل المؤرض يحدث عند جهد يتعدى جهد الطور الاعتباري. بـ %(30–20) – وبهذا الأسلوب– فإن نسبة جهد التشغيل إلى جهد الإطفاء في هذه المانعات يمكن أن يساوي 2.5 تقريباً. في المانعات التوحيدية، ذروة التيار بعد قفزة شرر الثغرة لا تتعدى 1.5 kA، أي أنها أقل بعدة مرات عن تلك الخاصة بمانعات الوقاية من الصواعق، ولكن فترة دوام مرور التيار أثناء الجهود الزائدة الداخلية تكون أعلى مرتان عن تلك التي أثناء الجهود–الزائدة الجوية. إذن –الطاقة– التي يجب أن تبددها المانعة تكون كثيرة والطلبات الموضوعة على سعتها أكثر خطورة. مطالب سعة إطفاء القوس لثغرة القوس تكون أيضاً أكثر خطورة، حيث إن الإطفاء يحدث في ظروف نظام العطل. في الحقيقة، بعد تخميد النظام العابر، فإن المانعة يجب أن تقطع تدفق التيار في ظروف نظام الحالة المستقرة. عندما يستطيع الجهد أن يصل إلى $(1.5\text{–}2.0)V_{ph}$. حيث إن جهد قفزة الشرر لثغرة الشرر يساوي حوالي $2.5V_{ph}$ ، فإن نسبة جهد قفزة الشرر إلى جهد الإطفاء η يجب أن يكون أقل من ذلك الذي في مانعات الوقاية من الصواعق أي يجب أن تكون في حدود (1.25–1.5). الوفاء بهذه المطالب يمثل أحد الصعوبات الأساسية في إنشاء مانعة توحيدية.

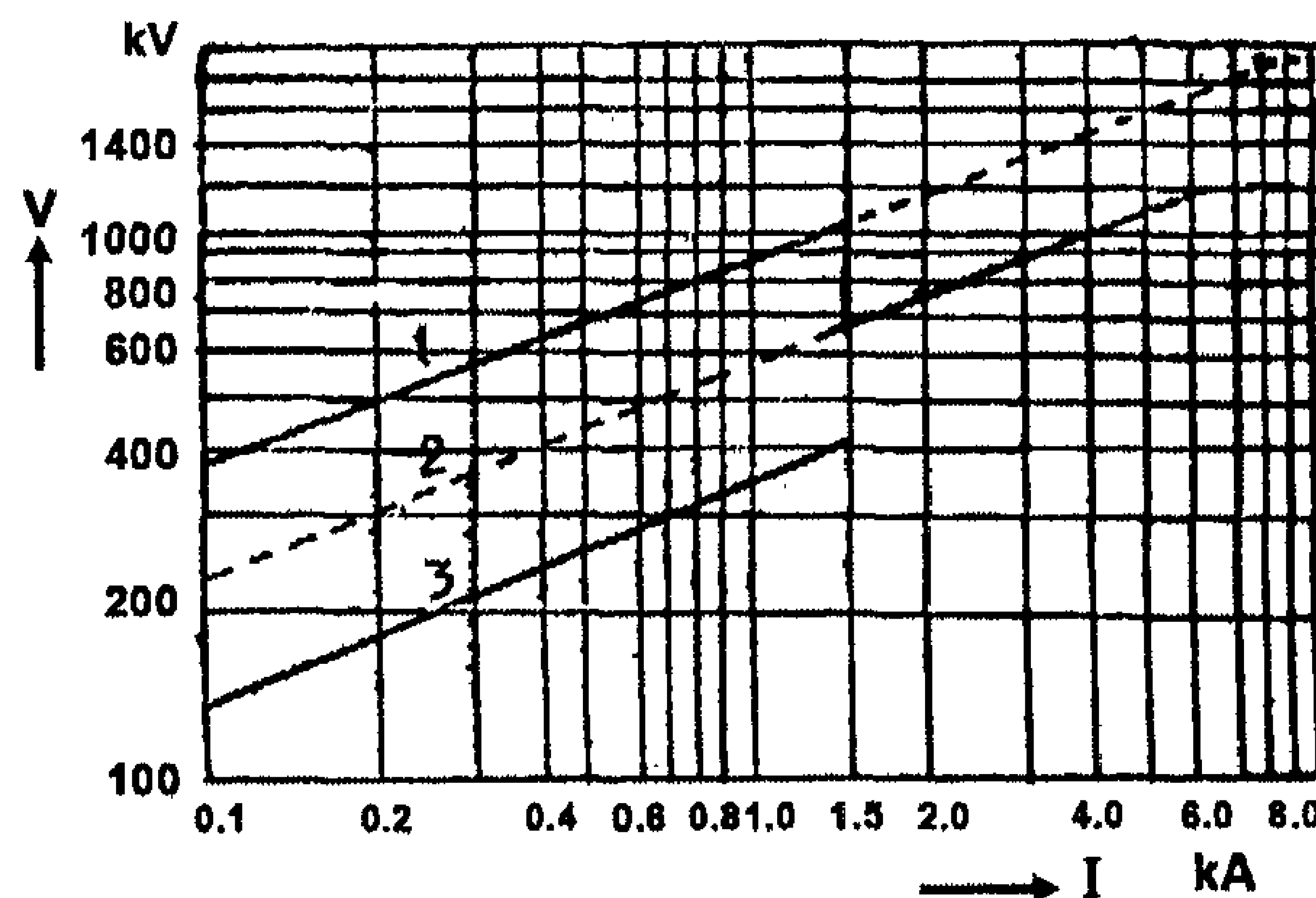
ثغرة شرر المانعة التوحيدية لا تختلف أساساً عن مانعة الصواعق، ولكن مع هدف تخفيض $\eta = V_{s.o}/V_{ext}$. الثغرات المنفردة للمانعة التوحيدية لها مسافة أصغر بين الإلكترودات و– بالتالي– فإن جهد قفزة الشرر لها kV_{max} (3–4) مقابل kV_{max} (5–6) لمانعة الصواعق. مع هذا التعديل نحصل على $\eta = V_{s.o}/V_{ext}$ تساوي (1.4–1.5) عند تيار تتبع 1000 A وعدد عمليات 20 .

على أساس صفة غير–الخطية للمقاومة، فإن تيار التتبع ينخفض بحدة في جوار مرور التيار خلال الصفر وتصبح المركبة الحرة لجهد إعادة الإشعال منخفضة جداً. وهكذا، يتعدى جهد إعادة الإشعال بشكل غير ملائم جهد تردد القدرة. ومن هنا فإن ثغرة الشرر تستطيع إطفاء تيار التتبع عند جهد تردد القدرة

$$V_{ext} = \frac{V_{s.o}}{\eta} \cong 1.6 V_{ph}$$

حيث V_{ext}= جهد الإطفاء.

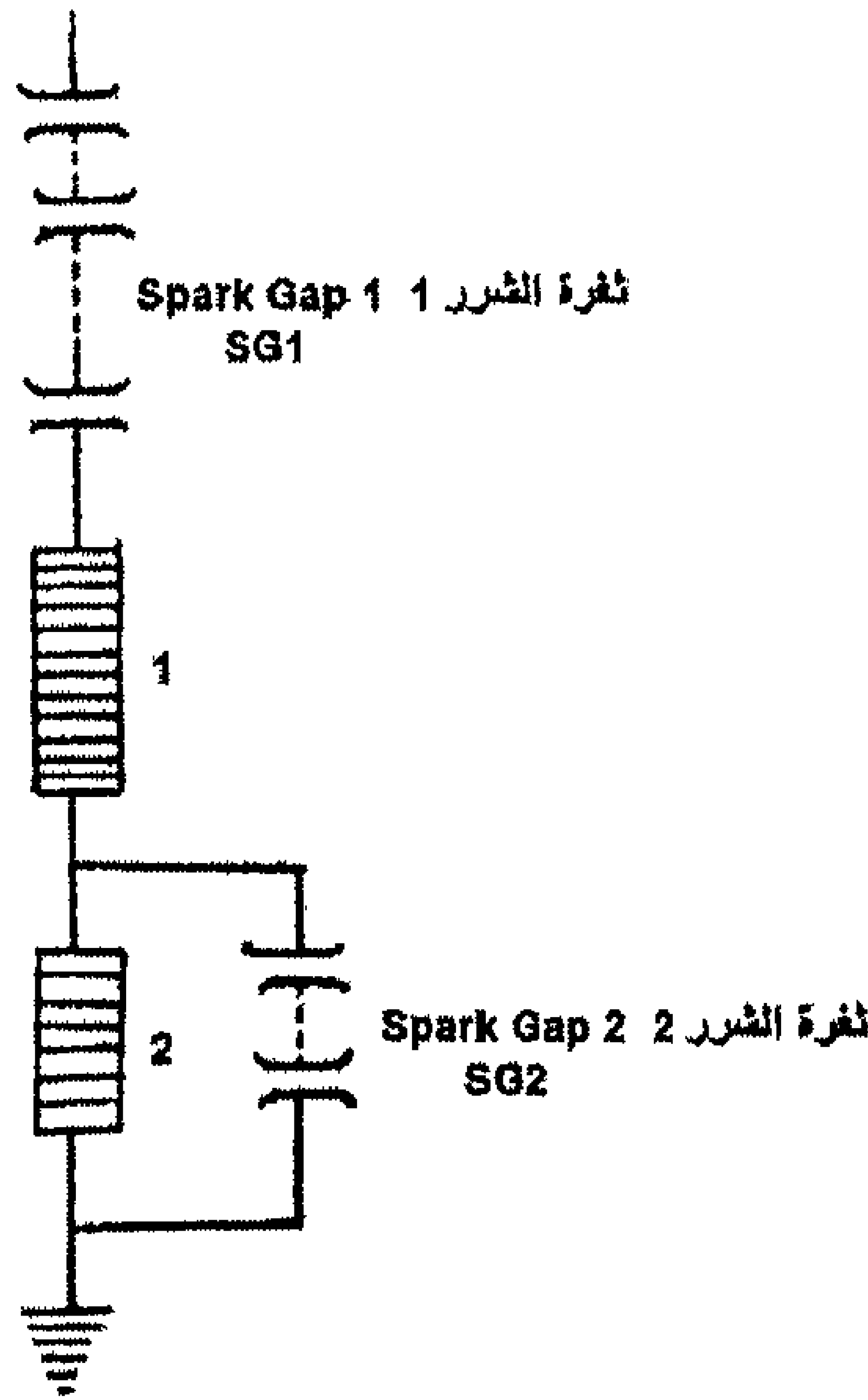
بالنسبة لمانعات التوحيد يكون مطلوب مادة ذات سعة كبيرة عن الـ Vilit، وهذه المادة المسماة Tervit تم تصنيعها في معهد All Union Electronical. العنصر الرئيسي لهذه المادة، – بنفس الطريقة كما في الفيليت– هو الكربورندم Carborundum ولكن تظهيره ينفذ عند درجة حرارة أعلى نسبياً. وأثناء ذلك –ولسوء الحظ– فإن خاصية الصمام الآلي للكربورندوم تفقد جزئياً ومعامل الصمام المتحصل عليه يكون 0.37 تقريباً في مدى تيار kA (1–1.5).



الشكل 14.49 : خصائص الفولت أمبير لمانعة صمام آلي 500 kV موحدة. (1) مانعة توحيد؛ (2) مانعة حماية من الصواعق؛ (3) الجهد على ثغرة الشرر SG_2

خصائص الفولت أمبير لمقاومة Tervit لمانعة عند 500 kV معطاة في الشكل 14.49، ومنه نرى أنه عند تيار 1.5 kA يكون الجهد المتخلف على المانعة هو 1070 kV، أي $2.5V_{ph}$ والذي يضمن حماية من الجهود الزائدة الداخلية.

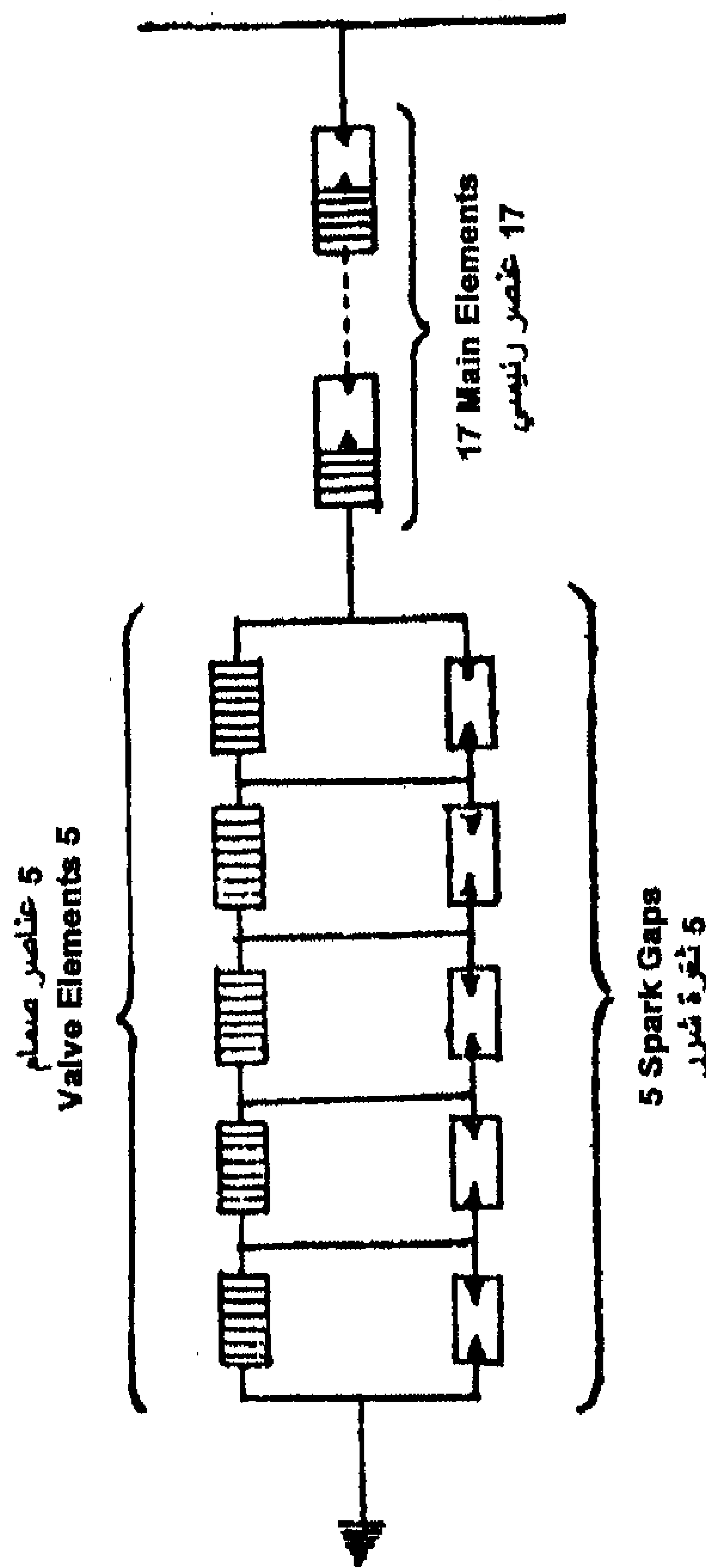
إذا مددنا خصائص الفولت أمبير حتى تيار 0 kA، المقنن عنده مانعات الحماية من الصواعق، فإن الجهد المتخلف سيصل إلى قيمة 2000 kV، الذي لا يضمن حماية العزل. من هنا فإن مانعات التوحيد لا يمكن أن تستخدم مباشرة لغرض الحماية من الصواعق. إلى جانب ذلك، ليس من المرغوب فيه تركيب مانعتين جنباً إلى جنبز وللخروج من هذا المأزق يستخدم ما يسمى بـ"المانعة الموحدة" combined arrestor. نظامها موضح في الشكل 14.50. وكما نرى من الشكل، يفرع جزء من أقراص الـ Tervit [حوالي 40%] في هذه المانعة بواسطة ثغرة وقاية إضافية SG_2 والتي لا يقفز الشرر بها أثناء الجهود الزائدة الداخلية. ومع مرور تيار أكبر من 1.5 kA خلال المانعة، يصبح الجهد على SG_2 أكبر من قفزة الشرر [التفريغ] لها [منحنى 3، الشكل 14.49]. وحيث إن جزء من الأقراص مفرع shunted، فإن خصائص الفولت أمبير تتغير إلى المنحنى 2 في الشكل 14.49 وينخفض الجهد المتخلف على المانعة عند تيار 10 kA إلى القيمة المسموحة.



الشكل 14.50: مخطط يوضح مبدأ تشغيل مانعات PBMK. SG_1 ثغرة الشرر الرئيسية؛ (2) ثغرة شرر التفرع؛ (1) جزء الصواعق من المقاومة؛ SG_2 ثغرة شرر التفرع

في الشكل 14.51 يبين مخطط مواقع عناصر مانعة PBMK 500 kV المانعة مكونة من 27 عنصر مركبين بطول خط مسنن لولبي بين أعمدة من عوازل سارية ومقسم إلى ثلاثة أرضيات. الأرضيتان العلويتان أي ما يسمى بـ"جزء الصواعق" يتكونان من 17 عنصر في كل منها يوجد 25 ثغرة شرر وثلاثة أعمدة متوازية من الأقراص مع 25 قرص في كل عمود [قطر القرص

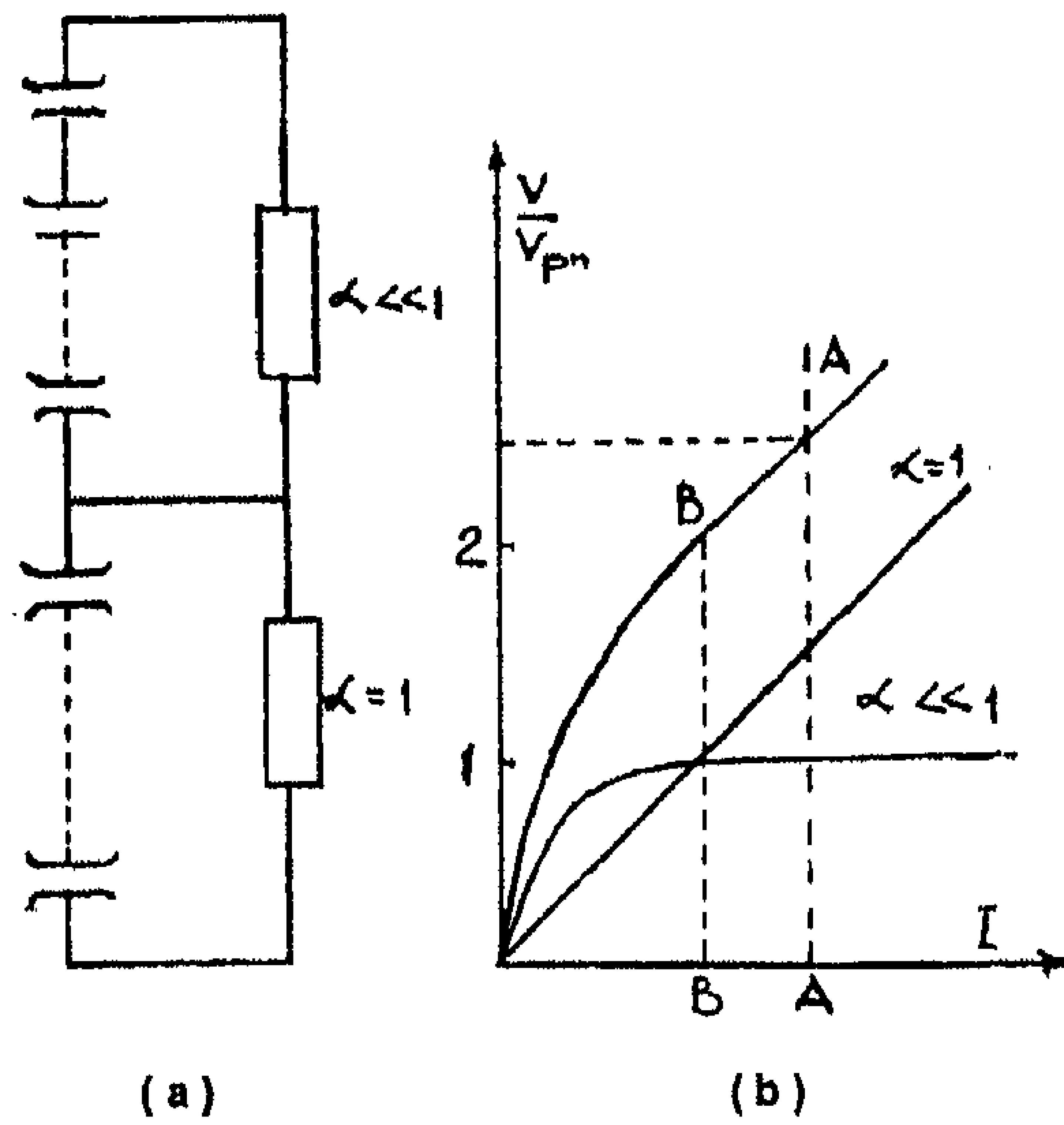
70 mm، ارتفاعه 20 mm]. في الأرضية السفلى يوجد 5 عناصر مع أقراص من ثلاثة أعمدة متوازية مع 55 قرص، 5 عناصر مع ثغرات في كل منها [32 ثغرة فردية في كلٍّ]. إجمالاً، تحتوي المانعة على 2100 قرص [3×700] [في جزء الحماية من الصواعق يوجد 3×425 قرص]، 500 ثغرة [340 في الصواعق، 160 في الجزء المفرع shunted].



الشكل 14.51: مخطط يبين مكان عناصر مانعة PBMK-500

عيب مانعات PBMK المصنعة حالياً هو جهد الإطفاء الصغير. إذا كان جهد الحالة المستقرة أكبر من $1.6V_{ph}$ فإن تيار التتبع لن يطفأ مما يسبب تدميراً للمانعة. في هذه الطريقة –مع ذلك– فإن التناقص الظاهري يبدو عند النظرة الأولى، فاستخدام المانعات يؤدي إلى خطورة كبيرة لتقييد الجهود الزائدة لنظام الحالة المستقرة بوسائل أخرى، مثلاً بمساعدة المفاعلات.

حالياً يُخطط لتصنيع مانعات لها جهد إطفاء متزايد يصل إلى حوالي $(1.8–2.0)V_{ph}$. ويتم ذلك بمساعدة النظام الموضح في الشكل 14.52(a). حيث تقسم ثغرة الشرر إلى جزئين. أحدهما مفرعة shunted بواسطة مقاومة خطية والأخرى بواسطة مقاومة غير–خطية. في الشكل 14.52(b) موضح خصائص الفولت أمبير لكل مقاومة وخصائص الفولت أمبير الإجمالية، وهذا المنشأ يسمح بتحديد توزيع الجهد بين أجزاء الثغرة. التوزيع غير–المنتظم للجهد يسهل التثقب [الخط المستقيم A-A]. خصائص مقاومات التفرع تكون متماثلة لذلك عند لحظة الإطفاء [الخط المستقيم B-B] يوزع الجهد بانتظام. من الشكل 14.52 نرى أن الجهد على جزء الثغرات المتفرع بواسطة مقاومة خطية يكون منخفضاً بحوالي 1.5 مرة، وجهد الإطفاء الإجمالي ينخفض بـ (1.3–1.5) مرة فقط. بهذه الطريقة، عند جهد إشعال $2.5V_{ph}$، من المكن الحصول على جهد إطفاء حوالي $(1.9–2.0)V_{ph}$.



الشكل 14.52: ثغرة شرر لها جهد إطفاء متزايد. (a) مخطط يبين مبادئ العملية؛ (b) خصائص الفولت–أمبير لمقاومات التفرع

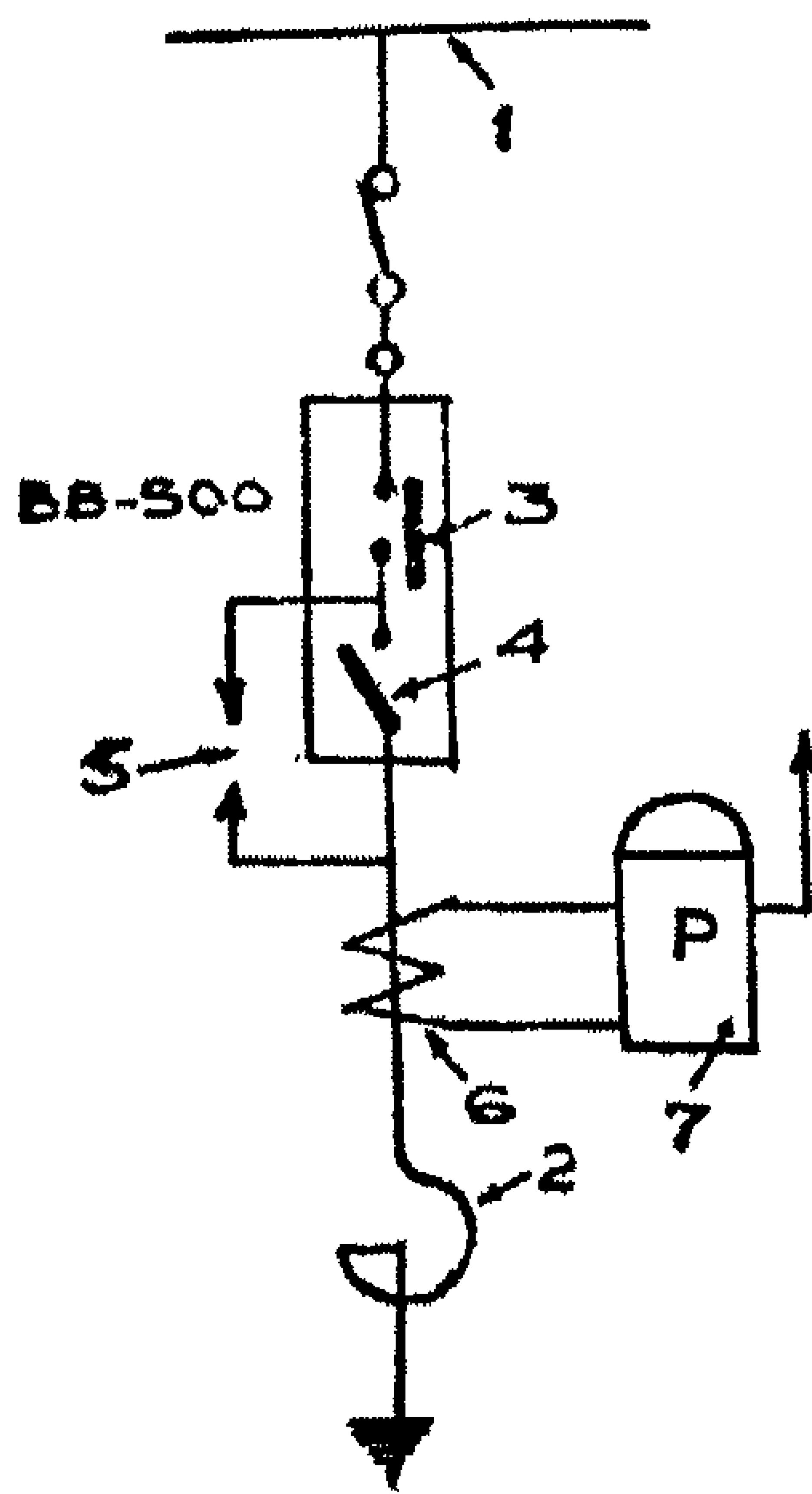
استخدام مانعات 500 kV PBMK مع جهد إطفاء $2.0V_{ph}$ يحل إلى درجة معقولة مشكلة الحماية من الجهود–الزائدة الداخلية. ومع ذلك، فإن المزيد من زيادة جهد الإطفاء يظل مرغوباً.

(هـ) توصيل وتأريض جزء من المفاعل خلال ثغرة شرر

Connection & Earthing a Part of the Reactor through a Spark Gap

يحدث أن تكون المفاعلات وسيلة مؤثرة للحد من الجهود–الزائدة لعمليات الحالات المستقرة والعابرة، ولكنها توصل بالخط ليس في كل أنظمة تشغيلها. ويبين الشكل 14.53 نظام توصيل المفاعلات مع الخط خلال ثغرة شرر تسمح بتوصيل المفاعل آلياً أثناء الجهود المتزايدة فقط. وقد اقترح بواسطة مجموعة عمل على النقل طويل المسافة لـ TEP. ثغرة الشرر تكون موصلة على التوازي بالتلامس المساعد المفتوح لقاطع الدائرة، والذي تلامسه الرئيسي مغلق عادة. جهد قفزة الوميض لثغرة الشرر يتم اختياره ليكون مساوياً لـ $1.5V_{ph}$. في عملية التشغيل الفعلي، يمكن ملاحظة الانحراف عن القيمة المقننة ±10% على أساس التشتت الإحصائي، ±10% بسبب تغير الظروف الجوية، أي أن جهد قفزة الشرر لثغرة الشرر يمكن أن تتذبذب في حدود $(1.2–1.8)V_{ph}$ الحد الأدنى يضمن فض موالفة ثغرة الشرر في أنظمة التدمير–اللاحق للتشغيل وأثناء التأرجح عندما يستطيع الجهد الارتفاع حتى $(1.1–1.2)V_{ph}$.

أثناء ارتفاع الجهد الموصل مع هذا التوحيد أو ذاك، فإن ثغرة الشرر تفرغ الشرر موصلة تلامسات العازل وتوصل المفاعل بالخط. ذروة amplitude العملية العابرة بعد تفريغ الثغرة يصبح أعلى قليلاً من ذلك الخاص بالمفاعل مصمت التوصيل، ولكنه يعتبر أقل من ذلك الذي يكون عند عدم وجود المفاعل. مرور التيار خلال المفاعل يشغل المرَّحل مما يسبب غلق تلامسات العازل ويطفئ القوس في ثغرة الشرر. ويبقى المفاعل موصلاً حتى يستعاد نظام العمل العادي للخط بعدها يمكن فصل قاطع الدائرة الخاص بالمفاعل بواسطة أفراد المحطة. تقطع التيار الحثي للمفاعل يمكن أن يُصَاحَب بشطر تيار current chop –ومع ذلك– لا يسبب جهود زائدة خطيرة على الخط ولكن جهد إعادة الإشعال على قاطع الدائرة يمكن أن يصل إلى $(2.0–2.5)V_{ph}$. ولهذا السبب توصل ثغرة الشرر على التوازي مع العازل وليس مع قاطع الدائرة الكامل لتجنب قفزات شرره. ميزة طريقة الحماية



الشكل 14.53: مخطط توصيل مفاعل خلال ثغرة شرر. (1) خط؛ (2) مفاعل 500 kV؛ (3) تلامسات رئيسية لقاطع الدائرة ABC 500؛ (4) عازل لـ ACB 500؛ (5) ثغرة شرر 500 kV؛ (6) محول تيار؛ (7) مرحل لفتح تلامسات المانعة 500 kV

مع مساعدة المفاعل السابق دراستها بأعلى هي أنها خالية من القيود التي يجب التعامل معها في حالة استخدام مانعات، أي أنها يمكن أن تستخدم في الأنظمة التي لها أي قيم من V_{ss}. وعلى النقيض من المانعات، فإن المفاعلات تحد من الجهود الزائدة ليس فقط للنظام العابر بل أيضاً لنظام الحالة المستقرة.

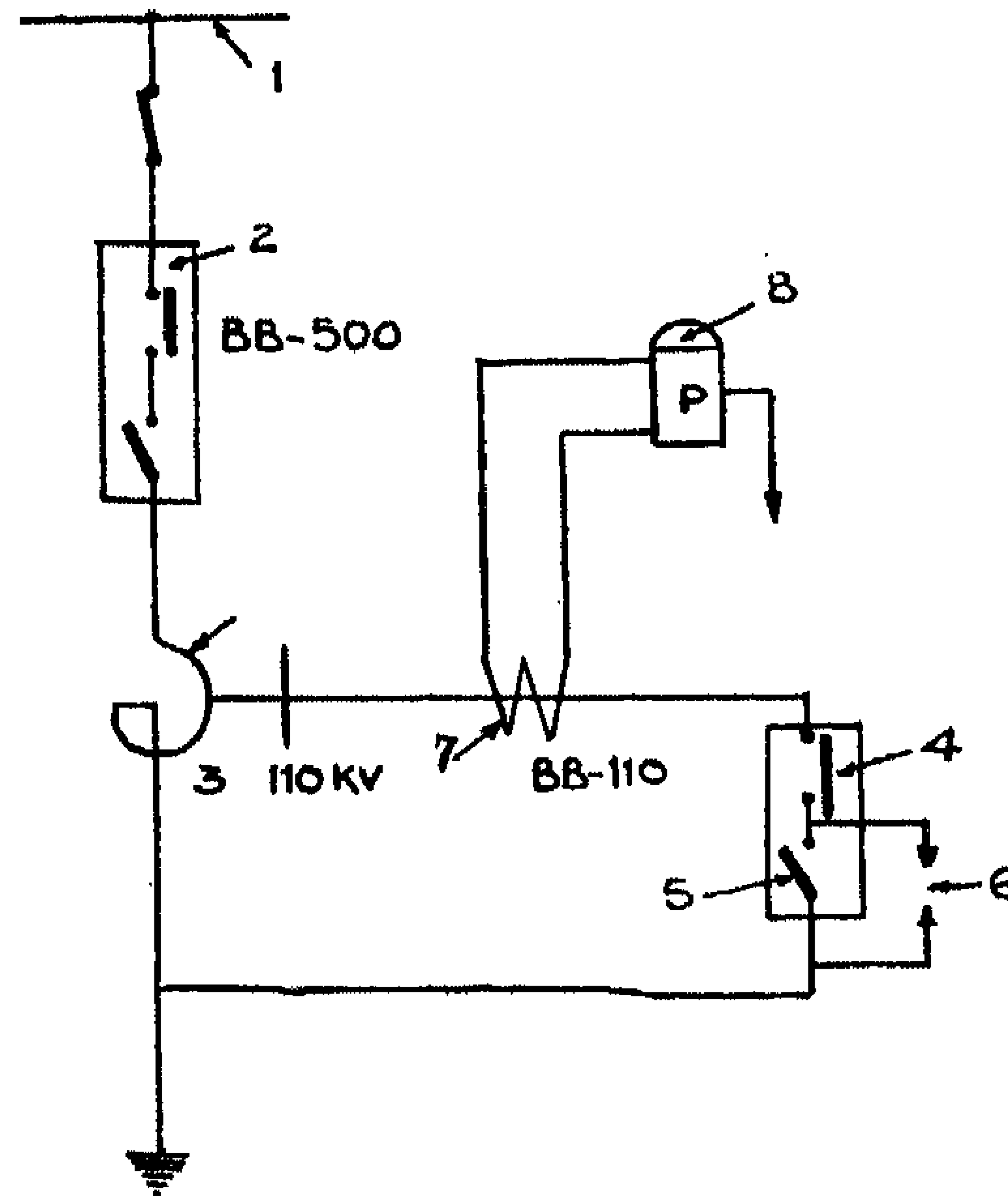
وحديثاً جاري تصنيع مفاعلات 500 kV مع تفرع 110 kV لإمداد الطاقة للمستهلكين المحليين الأقل أهمية. ويفترض استخدام هذا التفرع للحد من الجهود الزائدة الداخلية بواسطة تقصير short circuiting جزء من المفاعل بمساعدة ثغرة الشرر طبقاً للنظام المبين في الشكل 14.54 يوصل فرع 110 kV بالأرض خلال قاطع-دائرة، موازي للتلامسات المفتوحة

عادة للعازل، وموصل ثغرة شرر. والتي تثقب عند جهد $(1.5–1.8)V_{ph}$. ويشغل المرحل الموجود في دائرة قاطع الدائرة العازل الذي يغلق التلامسات ويحول الثغرة التي تسبب إطفاء القوس. وبعد ثوان قليلة، يفتح قاطع الدائرة أوتوماتياً، محولاً جزء من المفاعل مما يزيد بحدة التيار في الجزء المتبقي وتكون فترة دوام هذا النظام محدود بالاستقرار الحراري.

تقصير تفرع 110 kV للأرض خلال ثغرة الشرر تزيد من قدرة المفاعل بأربعة أمثال تقريباً والتي يجب أن تسبب تقييد محسوس للجهود الزائدة. نظام توصيل المفاعل خلال ثغرة شرر ونظام تقصير جزء من المفاعل مع الأرض خلال ثغرة شرر يمكن استخدامهم آنياً. في الوقت الراهن تنفذ أبحاث لفعالية هذا النظام والاستقرار الديناميكي.

نظام حماية خطوط النقل طويل المسافة من الجهود الزائدة، المطور حالياً، قائم على استخدام عدد من الوسائل، منها المانعات PBMK ذات الأهمية الكبيرة والمفاعلات مع ثغرات شرر.

مع المزيد من اكتمال مانعات الصمام–الآلي [تخفيض التثقب والجهود المتخلفة إلى $2V_{ph}$ عند جهد إطفاء في حدود $1.6V_{ph}$] سيسمح بتخفيض مستوى العزل إلى $2V_{ph}$ الضروري أثناء التحول إلى الخطوة التالية للجهد الاعتباري 750 kV nominal voltage .



الشكل 14.54 : مخطط لتنظيم المفاعل خلال ثغرة شرر. (1) الخط؛ (2) مفاعل 500 kV ؛ (3) تفرع المفاعل 110 kV ؛ (4) التلامسات الرئيسية لـ ACB 110 ؛ (5) عازل ACB 110 ؛ (6) ثغرة شرر 110 kV ؛ (7) محول تيار؛ (8) مرحل للتشغيل الآلي

المراجع

1. Alston, High Voltage Technology, Oxford University, 1968.
2. C.L. Wadhwa, High Voltage Engineering, New Age, 1994.
3. Craggs J.D. and Meek J.M. High Voltage Laboratory Technique, London, 1994.
4. D.V. Razevig, High Voltage Engineering, Khanna, 2000.
5. H.A. Peterson, Power System Transient, Dover, 1966.
6. Kuffel E., Zaengl W. High Voltage Engineering Fundamentals, 1984.
7. L.D. Loeb, The Kinetic Theory of Gases, Toh Wiley, New York, 1963.
8. Papoulis A. The Fourier Integrals and Its Application, Mc Graw Hill, 1962.
9. Reid R., High Voltage Resonant Testing, 1974.
10. V.A. Venikov, Transient in Power System.

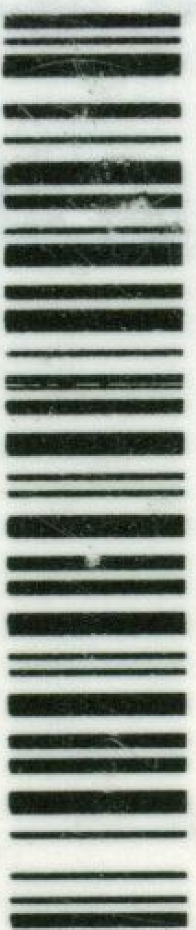
المحتويات

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع
٥ شارع الشيخ ريحان عابدين القاهرة
٢٧٩٥٤٢٣٩
www.sbh-egypt.com
e-mail : sbh@link.net
Scientific Book House

هذا الكتاب مرجع فى هندسة الجهد العالى، فهو يقدم أحدث الإنجازات فى هذا المجال بلغة سهلة وإسلوب واضح لكل مهندس انظمة القدرة المعقدة الحديثة والمدرسين والطلبة.

وهذا الكتاب يناقش الآتى:

آليـات الإنهيـار فى الغازات والسوائل والمواد الصلبة، توليد الجهود العالية DC , AC والتيـارات الدفعيـة. الخصائـص الكهربيـة والميكانيكية للعوازل عـوازل خطـوط نقل الطاقة الكهربية الهوائية وعزلها. عوازل أجهزة المحطة وعزل محطات التوزيـع. عـزل المحـولات، المولـدات وكابلات الضغط العالى قياسات الجهد العالى والتيار، اختبـارات الجهـد العالـى للمعـدات الكهربيـة الجهود الزائدة الجوية والوقاية منها، الجهود الزائدة الداخليـة والوقايـة منهـا وبهذه التغطية سيخدم الكتاب كمرجع ناجح للتعامل مع مبـادئ ومشاكـل هندسة الجهد العالى لخدمة العاملين فى هذا المجال من مهندسيـن وطلبـة ومدرسين لمسايرة التطور السريع والعاصـف فى أنظمـة الطاقة الكهربية والأ [illegible] ق





دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع

٥٠ شارع الشيخ ريحان - عابدين - القاهرة

☎ ٢٧٩٥٤٢٢٩

www.sbhegypt.org

e-mail : sbh@link.net